

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

Monitorování chování kapky pomocí vysokorychlostní kamery

Monitor Drop Behavior by Using High
Speed Camera

Student:

Radim Svozil

Osobní číslo:

SVO021

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Jana Jablonská, Ph.D.

Ostrava 2020

Zadání bakalářské práce

Student: **Radim Svozil**
Studijní program: **B2341 Strojírenství**
Studijní obor: **2302R007 Hydraulické a pneumatické stroje a zařízení**
Téma: **Monitorování chování kapky pomocí vysokorychlostní kamery**
Monitor Drop Behavior by Using High Speed Camera
Jazyk vypracování: **čeština**

Zásady pro vypracování:

1. Zpracujte teorii o povrchovém napětí a smáčivosti.
2. Sestavte experiment pro dopad kapky na různé povrchy.
3. Monitorujte experimenty pomocí vysokorychlostní kamery.

Seznam doporučené odborné literatury:

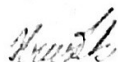
- [1] JANALÍK, J., ŠTÁVA, P. *Mechanika tekutin*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2002, 125s. ISBN 80-248-0038-1.
- [2] DRÁBKOVÁ, S. a kol. *Mechanika tekutin*: [online]. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2007. 257 s. ISBN 978-80-248-1508-4. [cit. 2016-10-05].
Dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/wp-content/uploads/2016/03/Drabkova-Mechanikatekutin.pdf>.
- [3] HUDEČEK, J. *Možné aplikace vysokorychlostních kamerových systémů v průmyslu*. [online]. Brno, 2013 [cit. 2019-09-30]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/26452>.
- [4] *Photron FASTCAM Mini UX50*. [online]. [cit. 2019-09-30].
Dostupné z: <http://www.highspeedimaging.com/photron-fastcam-mini-ux50/>.
- [5] KWON, K. S., KIM, H. S., CHOI, M. Measurement of inkjet first-drop behavior using a high-speed camera. *Review of scientific instruments* 87, 035101, 2016.
- [6] YU, Ch. K., HSIEH, P. R., YUTER, S. E., CHENG, L. W., TSAI, Ch. L., LIN, Ch. Y., CHEN, Y. Measuring droplet fall speed with a high-speed camera: indoor accuracy and potential outdoor applications. *Atmos. Meas. Tech.*, 9, 1755–1766S, 2016.
- [7] ČSN 01 6910 *Úprava písemností psaných strojem nebo zpracovaných textovými editory*. 1997.
- [8] ČSN ISO 690 *Bibliografické citace. Obsah, forma a struktura*. 1996.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jana Jablonská, Ph.D.**

Datum zadání: 20.12.2019

Datum odevzdání: 18.05.2020



doc. Dr. Ing. Lumír Hružík
vedoucí katedry



prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta:

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě13.5.2020.....

..........

podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou bakalářskou¹⁾ práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- беру на вѣдомі, że Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užit tuto závěrečnou bakalářskou¹⁾ práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské¹⁾ práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užit dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užit toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- беру на вѣдомі, že podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů - že tato bakalářská¹⁾ práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 13. května 2020



.....
Podpis studenta

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Svozil, R. *Monitorování chování kapky pomocí vysokorychlostní kamery: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, 2020, Vedoucí práce: Jablonská, J.

V teoretické části bakalářské práce je popsán princip a aplikace vysokorychlostních kamer v praxi, teorii povrchového napětí a smáčivosti. V praktické části práce je vyhodnocen úhel smáčivosti pro různé povrchy pomocí pořízených fotografií. Pro vyhodnocení smáčivosti jsou použity dvě kapaliny, kterými jsou voda a olej. V bakalářské práci jsou popsány záznamy z vysokorychlostní kamery při kapání různých kapalin na povrchy kapalné, pevné a sypké. Ze záznamu je vyhodnocený tvar, průměr, objem a hmotnost kapky, dobu letu, rychlost pádu kapky a sekundární reakci při dopadu kapky.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

Svozil, R. *Monitor Drop Behavior by Using High Speed Camera: Bachelor Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Hydrodynamics and Hydraulic Equipment, 2020, Thesis head: Jablonská, J.

In the theoretical part of this bachelor thesis are described the principles and applications of the high-speed cameras in practice, the theories of surface tension and contact angle. In the practical part of this thesis is also an evaluation of contact angles on different surfaces by using photos. I also used two fluids, water and oil, to evaluate the contact angle. In the bachelor thesis are described the records from high-speed camera during dripping various fluids to solid, liquid and powdery states. From the record I managed to evaluate the shape, diameter, volume and the weight, duration of the fall and secondary reaction during the fall of the drop.

Obsah

Seznam použitých značek, symbolů a odborných termínů	9
Seznam tabulek	10
Seznam obrázků	11
Úvod.....	12
1 Vysokorychlostní kamera	13
1.1 Využití vysokorychlostní kamery	13
1.2 Všeobecné a základní pojmy ke kamerám	14
2 Fyzikální vlastnosti používaných kapalin	18
2.1 Viskozita	18
2.2 Hustota	18
2.3 Kinematika kapky	19
3 Povrchové napětí	20
3.1 Povrchová energie.....	21
3.2 Kohezní práce, adhezní práce a rozestírací koeficient	22
3.3 Rozestírací koeficient.....	23
4 Youngova rovnice a úhel smáčení rovinného povrchu	24
4.1 Rozhraní tří fází: kapalina-plyn-pevná látka	24
4.2 Vlivy, které ovlivňují kontaktní úhel	25
4.3 Stanovení smáčecího úhlu na nehomogenním povrchu	27
5 Praktické využití povrchového napětí v praxi	30
5.1 Tvorba nanovláken.....	30
5.2 U povrchových úprav	30
5.3 Hydrofobní impregnace betonu.....	31
6 Určení úhlu smáčení pro různé povrchy	34
6.1 Popis experimentu.....	34
6.2 Postup při určování úhlů smáčení	37
6.3 Metodika vyhodnocení.....	38
6.4 Vyhodnocení měření	38
6.5 Závěr	43
7 Monitorování kapky pomocí vysokorychlostní kamery	44
7.1 Popis experimentu.....	44
7.2 Postup měření.....	47
7.3 Metodika vyhodnocení.....	48

7.4	Vyhodnocení experimentu	50
8	Závěr	56
9	Seznam použité literatury	57
10	Seznam příloh	61

Seznam použitých značek, symbolů a odborných termínů

SYMBOL	JEDNOTKA	VÝZNAM
a	[1]	závislý parametr
d	[m]	průměr
$dv \cdot dy^{-1}$	[1]	gradient rychlosti
E	[J]	povrchová energie
F	[N]	síla
g	$[m \cdot s^{-2}]$	gravitační zrychlení
h	[m]	výška
L	[m]	délka
m	[Kg]	hmotnost
p	[Pa]	tlak
P	$[m^2]$	povrch
r	[m]	poloměr
s	[m]	dráha
S	$[m^2]$	plocha
S_R	[J]	rozestírací koeficient
t	[s]	čas
T	$[^{\circ}C]$	stupeň celsia
T	[K]	teplota
U	[V]	napětí
v	$[m \cdot s^{-1}]$	rychlost
V	$[m^3]$	objem
W	[J]	práce
W_a	[J]	adhezní práce
W_k	[J]	kohezní práce
β	[1]	kompensující koeficient
γ	$[N \cdot m^{-1}]$	povrchová energie
γ_A	$[N \cdot m^{-1}]$	povrchová energie povrchu A
γ_{LS}	$[N \cdot m^{-1}]$	povrchová energie mezi pevným a kapalným povrchem
ε	[1]	drsnot povrchu
η	$[Pa \cdot s]$	dynamická viskozita
θ	$[^{\circ}]$	smáčecí úhel
σ	$[N \cdot m^{-1}]$	povrchové napětí
ρ	$kg \cdot m^{-3}$	hustota
τ	[Pa]	tečné napětí

ODBORNÝ TERMÍN	VÝZNAM
firewall	paketový filtr
fps	snímky za sekundu
postprodukce	následná editace
slow motion	zpomalování
snapshot	snímek obrazovky
soap opera	efekt videa
spáruji	propojím

Seznam tabulek

Tab. 3.1 Příklady povrchového napětí při 20 °C	21
Tab. 6.1 Fyzikální vlastnosti kapalin použitých v experimentu při 23 °C.....	33
Tab. 6.2 Výsledky vyhodnocení experimentu pro olej	39
Tab. 6.3 Vyhodnocení experimentu pro olej	39
Tab. 6.4 Výsledky vyhodnocení experimentu pro vodu	40
Tab. 6.5 Vyhodnocení experimentu pro vodu	41
Tab. 7.1 Zkoumané varianty	45
Tab. 7.2 Vyhodnocení měřených a vypočtených hodnot varianty 1	50
Tab. 7.3 Vybrané okamžiky varianty 1	51
Tab. 7.4 Časový průběh varianty 1	54
Tab. 11.1 Vyhodnocení měřených a vypočtených hodnot varianty 2	
Tab. 11.2 Časový průběh varianty 2	
Tab. 11.3 Vybrané okamžiky varianty 2	
Tab. 12.1 Vyhodnocení měřených a vypočtených hodnot varianty 3	
Tab. 12.2 Časový průběh varianty 3	
Tab. 12.3 Vybrané okamžiky varianty 3	
Tab. 13.1 Vyhodnocení měřených a vypočtených hodnot varianty 10	
Tab. 13.2 Časový průběh varianty 10	
Tab. 13.3 Vybrané okamžiky varianty 10	
Tab. 14.1 Měřítka	
Tab. 14.2 Přiřazení měřítek k variantám	
Tab. 14.3 Převod pixelů na milimetry	

Seznam obrázků

Obr. 1.1 Příklad využití záznamů ve výrobě [4].....	13
Obr. 1.2 Příklad využití záznamů ve zkušebnictví [3].....	14
Obr. 1.3 Záznam rychlosti šíření slunečního záření [5].....	14
Obr. 1.4 Princip snímkové frekvence [6].....	15
Obr. 1.5 Kamera Fastcam mini UX [7]	17
Obr. 1.6 Parametry kamery Fastcam mini UX [7].....	17
Obr. 3.1 Síly působící na molekuly	20
Obr. 3.2 Závislost povrchového napětí vody na teplotě	22
Obr. 4.1 Určení smáčecího úhlu	24
Obr. 4.2 Určení smáčecího úhlu	25
Obr. 4.3 Vliv adsorpce na úhel	26
Obr. 4.4 Vliv drsnosti povrchu na úhel smáčení [15]	27
Obr. 4.5 Měřicí schéma [14]	27
Obr. 4.6 Měřicí schéma [18]	29
Obr. 5.1 Princip elektrostatického zvlákňování [20]	30
Obr. 5.2 Před a po aplikaci plazmy [20]	31
Obr. 5.3 Papír po aplikaci nanoskla [20]	31
Obr. 5.4 Druhy úprav povrchu [21]	32
Obr. 6.1 Stanoviště pro záznam smáčecího úhlu, A1 – vhodné osvětlení, A2 – fotografický stan, A3 – stativ na fotoaparát	35
Obr. 6.2 Detail podložky, B1 – digitální fotoaparát, B2 – makro objektiv, B3 – podložka, B4 – zkoumaný povrch, B5 – zkoumaná kapalina	35
Obr. 6.3 Použitý makro objektiv [23]	37
Obr. 6.4 Vyhodnocení úhlu smáčení	38
Obr. 7.1 První stanoviště pořizující záznam, C1 – PC, C2 – vysokorychlostní kamera, C3 – stativ pro vysokorychlostní kameru, C4 – pracoviště č. 2, C5 – osvětlení	46
Obr. 7.2 Druhé stanoviště pro vykonání experimentu, D1 – Pasteurova pipeta (kapátko), D2 – stojan s držákem na kapátko, D3 – Petriho miska, D4 – podstavec	47
Obr. 7.3 Zakreslení skutečné vzdálenosti v programu.....	48
Obr. 7.4 Vyhodnocení dráhy a průměru	49

Úvod

Znalost povrchového napětí, smáčivosti a chování kapaliny je důležitá z hlediska výzkumu minimalizování především třecích ztrát v potrubí, a to jak při proudění vody například ve vodovodních sítích, tak při proudění oleje v hydraulických obvodech.

V obou experimentech srovnávám jednotlivé kombinace mezi kapkami vody nebo oleje a různými povrchy, na které je kapka nanášena nebo kapána. Proto jsem ve své práci uvedl teoretickou část, která se věnuje teorii o všeobecných vlastnostech kapalin, povrchovém napětí a smáčivosti.

V prvním experimentu se zabývám úhly smáčení a vyhodnocovat je budu pomocí fotografií. Znalosti ohledně problematiky smáčivosti jsou velmi cenné. Lze se s nimi setkat téměř v každém odvětví průmyslu. V hydraulice se tyto znalosti aplikují především na tematiku ohledně třecích ztrát v hydraulickém potrubí a hydraulických prvcích.

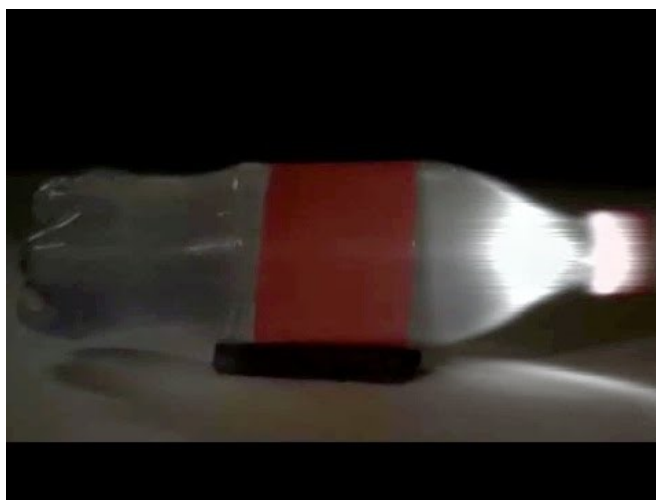
V druhém experimentu jsem pomocí vysokorychlostní kamery zaznamenával experiment, ve kterém kapka vody nebo oleje dopadala na různé povrchy. Cílem je z videí vyhodnotit tvar a velikost kapky v letu. Dále jsem popsal primární a sekundární reakci kapky při dopadu. Problematika také souvisí s povrchovým napětím kapaliny. Znalost povrchového napětí je nutná z důvodu interakce mezi jednotlivými médii. Tento experiment s jeho vyhodnocením jsem vytvořil také pro propagaci.



Obr. 1.2 Příklad využití záznamů ve zkušebnictví [3]

Věda a výzkum

Věda a výzkum se neustále posouvají kupředu. Díky použití vysokorychlostních kamer jsme schopni zachytit děj nebo reakci, které jsou tak rychlé, že je ani nejde postřehnout pouhým okem. Pomocí pořízeného záznamu lze následně vyhodnotit požadované hodnoty zachycených dějů, jež můžou být tak rychlé, že jim nestačí ani vysokorychlostní kamery, ale používají se tzv. ultrarychlé kamery. V roce 2011 byla na Massachusettském institutu technologií zaznamenána rychlost šíření světelného záření [2].



Obr. 1.3 Záznam rychlosti šíření slunečního záření [5]

1.2 Všeobecné a základní pojmy ke kamerám

1.2.1 Snímkovací frekvence

Je to frekvence, při níž zařízení zaznamenává snímky za jednu sekundu. Pro snímkovou frekvenci se udává jednotka fps (z anglického frames per second) nebo v hertzích. Princip snímkovací frekvence na obr. 1.4.

Nejčastěji používané nastavení fps:

24fps-

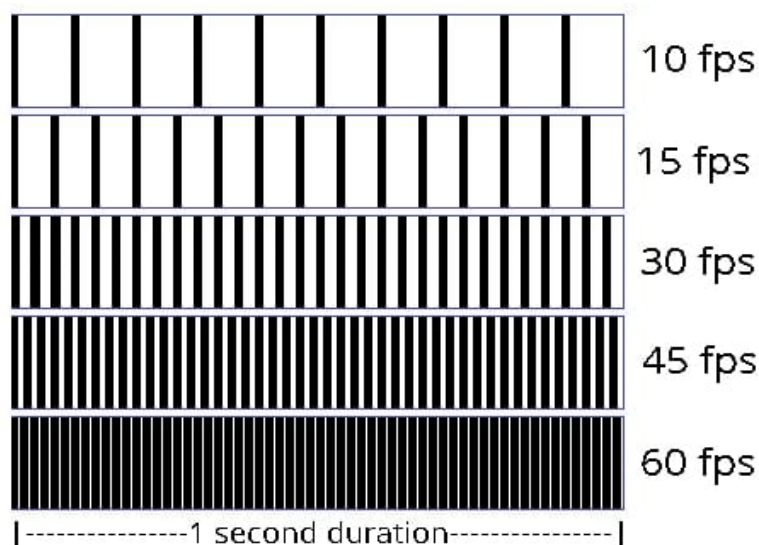
Standard pro filmy a TV pořady. Tato hodnota byla určena jako minimální rychlost potřebná pro zaznamenání videa, které si stále zachová realistický pohyb. I když se některé filmy snímají na vyšší snímkovací frekvenci, často jsou vysílány právě ve 24 fps [6].

30fps-

Dříve používaný formát pro televizní vysílání, ale producenti se nyní spíše orientují směrem k 24fps důvodem je, že nynější televize jsou navrženy pro standardních 24 fps a při vyšších hodnotách se můžeme setkat s efektem „soap opera“. Tento efekt se nám projeví při zpomalení videa, kdy se obraz jeví jako rozostřený. Důvodem je, že se část předchozího snímku zobrazuje do právě přehrávaného. Tento formát se v nynější době používá pro videa s velkým množstvím pohybu a pro záznam sportovních utkání [6].

60+fps-

Cokoliv vyššího než formát 30 fps se používá spíše pro nahrávání scén s velkým množstvím pohybu jako počítačové hry nebo experimentů pro účelné zpomalování, tzv. „slow motion“ pro zobrazení rychlých dějů a povšimnutí si detailů [6].



Obr. 1.4 Princip snímkové frekvence [6]

1.2.2 Rozlišení snímáče

Každý snímáček je vytvořen z jednotlivých pixelů (bodů). Tento počet je předem pevně stanoven. Řadí se ve sloupcích a řadách a jsou značeny jako součin sloupců a řad, např.: 800×600 , to znamená 600 pixelů na výšku a 800 pixelů na šířku, dohromady tedy

480 000 px. Vnější obvodová řada pixelů se používá jako sběrnice, která je následně v postprodukci odstraněna.

1.2.3 Citlivost neboli ISO

Jeden ze základních parametrů, který určuje expozici výsledného snímku. ISO citlivost se vyjadřuje ve formátu ISO 100. O stupeň vyšší citlivost je dvojnásobkem hodnoty předešlé, proto se obvykle dosahuje hodnot jako 200, 400, 800 atd. Jestliže je nastavena citlivost na hodnotě ISO 400, pro snímek bude potřeba poloviční množství světelného záření než při ISO 200.

1.2.4 Barevná hloubka

Je termín používaný v počítačové grafice. Každá barva je složena ze tří základních barev v konkrétním zastoupení neboli intenzitě. Základní barvy jsou červená, zelená a modrá, toto barevné spektrum se označuje jako RGB. Intenzita je udávána v procentech, nebo pomocí barevné hloubky, která je charakterizována počtem bitů, ve kterých daná barva dominuje.

1.2.5 Obrazový procesor

Část kamery, která zpracovává a vyhodnocuje informace. Výsledný obraz se tvoří právě zde pomocí předaných informací poskytnutým snímačem. Vyhodnotí jas a barevnost jednotlivých pixelů, upravuje vyvážení bílé barvy a aplikuje filtry, které redukuje šum. Výsledný obraz komprimuje a posílá dále po řetězci do paměťového média.

1.2.6 Ukládání dat

Jsou generována vysokorychlostní kamerou, má největší vliv na rychlost snímání. Senzor je chopen snímat a generovat velké množství dat. Procesor je stejně jako senzor schopen tato data zpracovat a poslat dále. Problém nastává při zápisu do úložiště, kde klasický HDD disk není schopen tato data zapisovat. Z toho důvodu jsou vysokorychlostní kamerové systémy nuceny používat paměti typu RAM, která je schopna ukládat svá data bez prodlev. Nevýhodou RAM disků je, že po přerušení dodávajícího elektrického proudu se všechna data na něm uložená vymažou. Proto existuje spolupráce RAM a HDD disků, kdy jsou prvotní informace rychle zapisovány na Ram paměť a ty poté předávají HDD diskům, jež umožňují následné uživatelské operace.

1.2.7 Popis mnou používané kamery

Vysokorychlostní kamera Photron FASTCAM Mini UX50 poskytuje skutečně vysokou rychlost a výkon. Rozměry kamery jsou opravdu malé. Poskytuje rozlišení $1\,280 \times 1\,024$ pixelů na 2 000 snímků za sekundu (fps) a při snížení rozlišení může poskytnout až 160 000 fps. Díky těmto parametrům je UX50 malá a lehká. Její závěrka dokáže pracovat až s rychlostí 4 mikrosekundy bez rozmazání snímků. Proto se hodí pro různé aplikace, jako jsou mechanika tekutin, biologické vědy nebo balistické testování.



Obr. 1.5 Kamera Fastcam mini UX [7]

Mini UX50							
Resolution	Frame Rate	8GB		16GB		32GB	
(h x v pixels)	Max fps	Frames	Time (sec)**	Frames	Time (sec)**	Frames	Time (sec)**
1280 x 1024	2,000	4,365	2.18	8,734	4.37	17,472	8.74
1280 x 800	2,500	5,587	2.23	11,179	4.47	22,364	8.95
1280 x 720	3,200	6,208	1.94	12,421	3.88	24,849	7.77
1280 x 512	4,000	8,734	2.18	17,468	4.37	34,944	8.74
1280 x 120	20,480	37,248	1.82	74,531	3.64	149,096	7.28
1024 x 1024	2,000	5,458	2.73	10,917	5.46	21,840	10.92
896 x 896	2,500	7,129	2.85	14,259	5.70	28,526	11.41
1280 x 24	102,400	186,242	1.82	372,656	3.64	745,483	7.28

* Specifications subject to change without notice.

** Recording time is an estimate and may be different depending on recording conditions and settings.

Obr. 1.6 Parametry kamery Fastcam mini UX [7]

2 Fyzikální vlastnosti používaných kapalin

Pro oba experimenty byl použit hydraulický olej RENOLIN VG 46 a voda. Protože je pro ně důležité znát vlastnosti daných kapalin, je zapotřebí si stanovit nejvíce sledované veličiny.

2.1 Viskozita

Dynamická viskozita pro Newtonovy kapaliny je dána Newtonovým zákonem.

$$\tau = \eta \frac{dv}{dy} \quad (1)$$

Viskozita je proměnlivá a závislá na teplotě, kde závislost určuje daný viskózní index. Obecně platí, že s rostoucí teplotou viskozita tekutiny klesá a naopak. Tepelnou závislost dynamické viskozity lze vyjádřit vztahem.

$$\eta = \eta_0 \cdot e^{-a \cdot (T - T_0)} \quad (2)$$

Kde η_0 je dynamická viskozita při teplotě T_0 , a je parametr závislý na druhu kapaliny, T je skutečná teplota kapaliny.

Kinematická viskozita se značí ν a v praxi se vyskytuje častěji než viskozita dynamická. Udává se v jednotkách $[mm^2 \cdot s^{-1}]$ nebo $[m^2 \cdot s^{-1}]$ a spočítá se jako dynamická viskozita podělená hustotou.

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (3)$$

2.2 Hustota

Hustota neboli měrná hmotnost je poměr hmotnosti a objemu zkoumané elementární částice tekutiny.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (4)$$

Na rozdíl od viskozity se hustota se změnou tlaku nebo teploty mění jen minimálně, a proto se v praxi považuje za konstantu. Výjimkou je ovšem voda, která se při zahřívání z 0 °C na 4 °C nejprve smršťuje, tedy zvětšuje svou hustotu, a při následném zahřívání nad 4 °C se rozpíná, zmenšuje svoji hustotu. Tato vlastnost byla označena jako anomálie vody [24, 25].

Hustotu potřebnou pro můj experiment pro vodu a olej jsem vyčetl z fyzikálních tabulek.

2.3 Kinematika kapky

Kapka padá na různé povrchy volným pádem, který je definován jako rovnoměrně zrychlený pohyb s přímou trajektorií a s nulovou počáteční rychlostí. Musí se ale splnit dvě podmínky, a to:

1. Padající těleso se musí nacházet v homogenním gravitačním poli.
2. Na padající těleso nesmí působit žádná odporová síla, např. odporová síla vzduchu.

Experiment bude prováděn na zemském povrchu v České republice v městě Ostrava. V tomto místě se podle gravimetrické mapy udává zrychlení $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. Gravitační zrychlení není konstantní a mění se s nadmořskou výškou. Na každém místě planety je nepatrně rozdílné, což je způsobené tím, že zemský povrch není ve tvaru koule, ale rotačního elipsoidu. Lze říci, že na severním, nebo jižním pólu, kde je gravitační zrychlení větší, by experiment probíhal jinak [26].

Experiment probíhal v místnosti, kde nepůsobily tečné síly např. větru a dráha letu byla natolik malá, že lze zanedbat i odpor vzduchu při pádu.

Obě podmínky byly splněny, a tak se experiment může opírat o znalosti ohledně volného pádu.

Rychlost padajícího tělesa lze zapsat jako:

$$v = g \cdot t \quad (5)$$

kde v je rychlost padajícího tělesa v čase t .

Výšku padajícího tělesa vypočítám:

$$h = \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2 \quad (6)$$

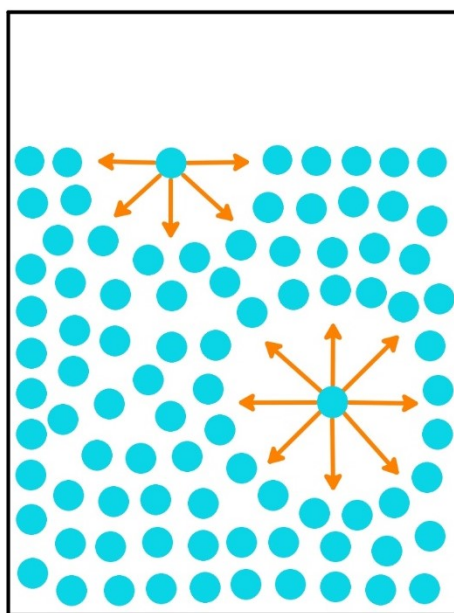
Jestliže znám výšku, jsem schopen dopočítat čas dopadu t .

$$t = \sqrt{\frac{2h}{g}} \quad (7)$$

3 Povrchové napětí

Velmi známou fyzikální veličinou je právě povrchové napětí σ ($N \cdot m^{-1}$), které se zabývá rozhraním kapaliny. Rozhraní si můžeme představit tak, že je obklopeno velmi tenkou a napjatou vrstvou s vlastností pružné blány, kterou definujeme určitým povrchovým napětím. Kapalina se tedy vyznačuje jinými vlastnostmi uvnitř objemu kapaliny a na rozhraní [8].

Povrchové napětí je zapříčiněno silami působícími mezi molekulami uvnitř kapaliny. Způsobují to Van der Waalsovy přitažlivé soudržné síly, které usilují o to, aby částice byly co nejvíce směstnané u sebe. Uvnitř kapaliny je částice obklopena jinými částicemi ze všech stran, takže se jejich síly vyruší a částice zůstává v klidu. Jinak tomu je v blízkosti povrchu a rozhraní, kde na částici působí síly kapaliny jen z jedné strany a síly na druhé straně jsou slabší (např. atmosférický tlak), nebo jsou obklopeny pevnou hmotou, která na částici nepůsobí žádnou silou. Proto jsou síly na rozhraní nevyrovnané, a proto síla F směřuje dovnitř kapaliny [8].



Obr. 3.1 Síly působící na molekuly

Částice kapaliny jsou velmi malé, proto se nerovnováha mezi částčkami projevuje jenom v nepatrné vrstvě na hladině kapaliny. Kdybychom chtěli přemístit částčku kapaliny z rozhraní, museli bychom vynaložit sílu, tudíž i práci. Kdybychom přemísťovali částici z objemové fáze do vrstvy na povrchu, museli bychom jí předat určité množství energie. Proto jsou částice v povrchové vrstvě více nabitý energií než částice v objemové části. Takže aby se částice dostala na povrch, musí vykonat určitou práci [8].

Aby se zachovala silová rovnováha mezi částicemi, vzniká síla, která se nazývá povrchové napětí. Povrchové napětí slouží kapalině s volnou hladinou ke zmenšení volné energie tím, že ztenčuje vrstvu na povrchu kapaliny a tím minimalizuje plochu rozhraní, čehož dosáhne stavu s minimem energie. Matematicky lze povrchové napětí definovat jako sílu, která působí kolmo na jednotku délky v povrchové vrstvě [8].

$$\sigma = \frac{E}{S} = \frac{F}{l} \quad (8)$$

Úhel smáčení je přímo ovlivněn velikostí povrchového napětí v závislosti na druhu látek. Platí, že s narůstajícím povrchovým napětím narůstá i úhel smáčení, který leží mezi pevným povrchem a danou kapalinou. Kapalina může tvořit rozhraní s jakoukoliv látkou, kterou je obklopena, ať už je to plyn, kapalina nebo pevná látka. Podle toho rozlišujeme všechny jednotlivé fázové rozhraní. Síly mezi molekulami kapaliny vždy budou mít potřebu vyrovnávat se se silami působícími ve vedlejším prostředí a výsledkem bude povrchové napětí dané vektorovým součtem obou povrchů [8].

3.1 Povrchová energie

Aby se vytvořil nový povrch, musí se použít určité množství práce, která závisí na počtu částic, které byly převáděny z objemové fáze do fázového rozhraní a do plochy nově vytvořeného rozhraní [8].

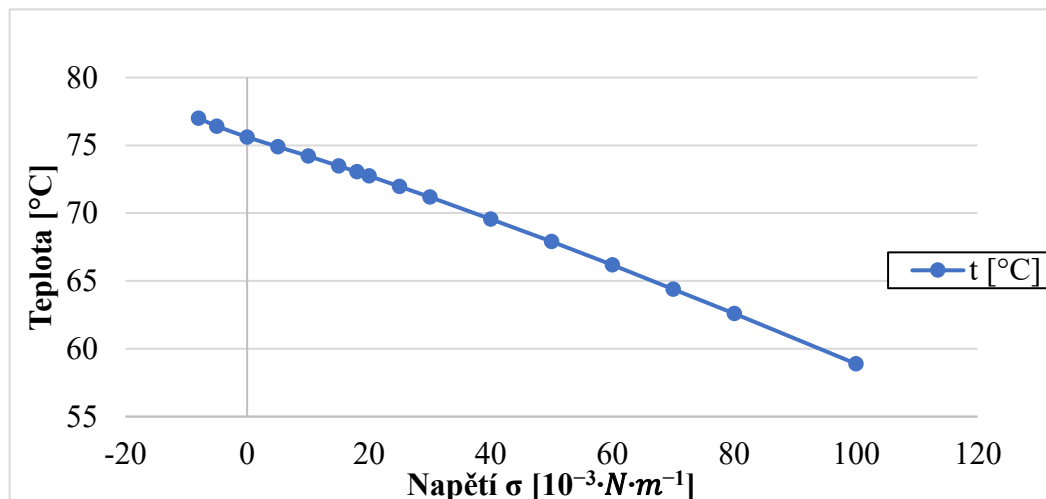
$$dW^s = \gamma \cdot dS \quad (9)$$

kde konstanta úměrnosti γ určuje izotermní vratnou práci potřebnou ke zvětšení plochy fázového rozhraní a označuje se jako povrchová energie. Protože to je systém složený z více fází, který se vždy uspořádává tak, aby byl součet energií všech potenciálních energií a energií fázových rozhraní byl minimální. Proto se výpočty shodují jak číselně, tak i rozměrově, například u vody $\sigma = 72,7 \text{ mN} \cdot \text{m}^{-1}$ a $\gamma = 72,7 \text{ mN} \cdot \text{m}^{-1}$ [8].

Tab. 3.1 Příklady povrchového napětí při 20 °C

Kapalina	$\sigma [10^{-3} \cdot \text{N} \cdot \text{m}^{-1}]$
Etanol (lih)	22,55
Kyselina octová	28,00
Olej olivový	33,00
Voda	72,75
Rtuť	476,00

Povrchové napětí a energie klesá s rostoucí teplotou.



Obr. 3.2 Závislost povrchového napětí vody na teplotě

3.2 Kohezní práce, adhezní práce a rozestírací koeficient

3.2.1 Kohezní práce

Pro izotermní roztržení sloupce tuhé látky nebo kapaliny o jednotkovém průřezu je potřebná kohezní práce W_k . Jestliže molekuly kapaliny mají větší soudržnost (kohezi) než přilnavost (adhezi) k povrchu, jedná se o povrch nesmáčivý neboli hydrofobní [26].

$$W_k = 2\gamma_{LS} \quad (10)$$

3.2.2 Adhezní práce

Adheze (v obecném smyslu „přilnavost“) je schopnost materiálu (především dvou rozdílných materiálů) spolu přilnout. Pro izotermní roztržení fází A a B kolem fázového rozhraní ploch je potřebná adhezní práce W_a . Při tomto roztržení zanikne energie γ_{AB} v mezifázi AB a vytvoří se dva nové povrchy fází A a B s novými povrchovými energiemi γ_A a γ_B . Adhezní práce se vyjadřuje Dupréovou rovnicí.

$$W_a = \gamma_A + \gamma_B - \gamma_{AB} \quad (11)$$

Adheze mezi dvěma nemísitelnými kapalinami (dvě různé kapaliny L1 a L2):

$$W_a = \gamma_{L1} + \gamma_{L2} - \gamma_{L1L2} \quad (12)$$

Adheze mezi tuhou látkou a kapalinou. S je označení pro pevnou látku (solid) a L pro kapalnou látku (liquid) [8].

$$W_a = \gamma_{SL} \cdot 1 + \cos\theta \quad (13)$$

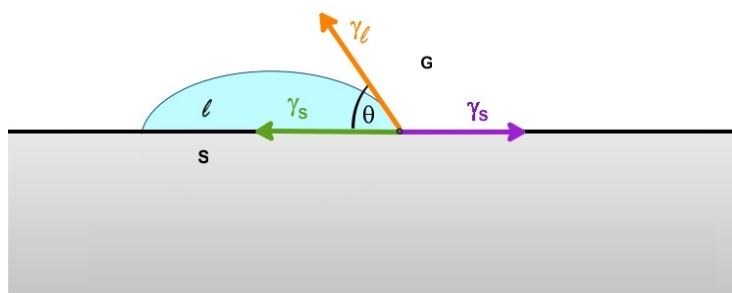
3.3 Rozestírací koeficient

Jestliže je rozestírací koeficient kapalné látky na látce pevné kladný ($W_a < W_k$), kapalina se rozestře na povrch pevné látky. Pokud je ale koeficient záporný, kapalina utvoří na povrchu pevné látky kapky [8],[10],[11].

$$S_R = W_a - W_k = \gamma_{SG} - \gamma_{SL} - \gamma_{LG} \quad (14)$$

4 Youngova rovnice a úhel smáčení rovinného povrchu

Úhel smáčení je míra smáčení kapalné látky na pevném povrchu. Smáčecí úhel je úhel, který je sevřený mezi pevnou látkou a tečnou ke kapalině s počátkem v bodě, kde se stýká rozhraní s kapkou. Pevná látka, kapalina a plyn se potkávají v křivce, která se nazývá linie smáčení. Tvar kapky je charakterizován právě smáčecím úhlem v linii smáčení [10],[14].



Obr. 4.1 Určení smáčecího úhlu

4.1 Rozhraní tří fází: kapalina-plyn-pevná látka

Při styku nerozpustné pevné látky s povrchem kapaliny jsou uplatněny tři mezifázové energie: povrchová energie kapaliny γ_{LG} , která ovlivní výsledné systémové uspořádání, mezifázová energie kapaliny a pevná látka γ_{SL} a povrchová energie látky pevné γ_{SG} . Mezi rozhraním dvou objemových fází charakterizuje rozhraní mezifázové napětí. Trojfázové rozhraní charakterizuje smáčecí neboli kontaktní úhel θ [8],[10].

Jestliže tuhá fáze tvoří svislou stěnu nebo rovinnou podložku a druhá fáze je kapalina nebo plyn, musí platit podmínka rovnováhy neboli Youngova rovnice:

$$\gamma_{SG} - \gamma_{SL} = \gamma_{LG} \cdot \cos\theta \quad (15)$$

Po úpravě:

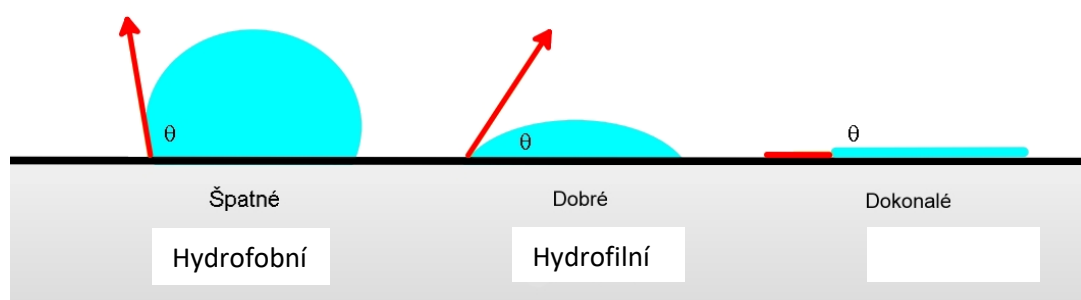
$$\cos\theta = \frac{\gamma_{SG} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LG}} \quad (16)$$

Představitel γ_{XY} znázorňuje hodnotu mezifázového napětí umístěného na rozhraní dotýkajících se dvou fází. Rozhraní se označují SG a značí rozhraní mezi pevným a plynným povrchem, SL znázorňuje rozhraní mezi pevným a kapalným povrchem a LG označuje rozhraní kapaliny a plynu. Tato rovnice předpokládá, že povrch pevné látky je ideálně hladký a homogenní.

Jestli kapalná látka povrch smáčí, či ne, ovlivňuje velikost úhlu smáčení θ . Když je úhel smáčení θ menší než 90° , je pevný povrch lyofilní, tedy kapalná látka pevnou látku dobře smáčí. Jestliže je úhel θ větší než 90° , pevná látka je lyofobní, tedy kapalná látka pevnou látku smáčí špatně, nebo ji nesmáčí. V oblasti vodního prostředí lze povrchy nazývat hydrofilní a hydrofobní. Hydrofilní se nazývá povrch smáčený a hydrofobní povrch nesmáčený. Tento jev můžeme v praxi najít zejména u čisticích prostředků, ve kterých jsou obsaženy látky hydrofilní i hydrofobní. Když jsou tyto látky aplikovány na nežádoucí špínu, hydrofilní a hydrofobní látky při vzájemném působení nežádoucí špínu obklopí a vzápětí ji začne po vrstvách roztrhávat.

Dokonalé smáčení neboli roztírání znamená, že se kapka rozteče na pevné vrstvě na tenkou souvislou vrstvu. Dochází k tomu tehdy, když je povrchová energie pevné smáčené fáze větší než součet energie povrchové kapalné látky a energie mezifázové na fázi mezi kapalnou látkou, která tvoří kapku, a pevnou látkou. Při roztírání je tedy kontaktní úhel $\theta = 0^\circ$ nebo $\theta = 180^\circ$, pak Youngova rovnice vypadá následovně [8],[10],[11].

$$\gamma_S = \gamma_L + \gamma_{SL} \quad (17)$$



Obr. 4.2 Určení smáčecího úhlu

4.2 Vlivy, které ovlivňují kontaktní úhel

4.2.1 Drsnost povrchu

S drsností povrchu je třeba počítat u všech pevných površích, jelikož žádný technologický postup nám nezajistí dokonale hladký povrch. Dobře smáčeující kapalné látky lépe smáčeují drsný povrch než hladký povrch, zatímco u kapalin s horší tendencí smáčení se je tomu právě naopak. Proto se zavádí koeficient $\beta > 1$, který kompenzuje drsnost povrchu.

$$\gamma_{GS} - \gamma_{LS} = \beta \cdot \gamma_{LG} \cdot \cos\theta \quad (18)$$

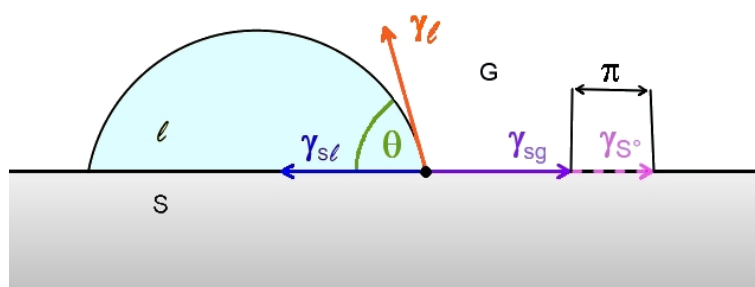
Hodnota koeficientu β se získává pomocí porovnání hodnot $\cos\theta$ naměřených na hladkém a drsném povrchu[10].

4.2.2 Adsorpce látek

Při tomto ději se molekuly plynné fáze vážou na povrch pevné látky pomocí vazeb (např. van der Waalsových). Díky adsorpci se snižuje povrchová energie látky tuhé z γ_{S^0} , což je povrchová energie tuhé látky, na energii γ_{SG} , která je v rovnováze s pevnou látkou a plynnou. Rozdíl mezi povrchovou energií pevného tělesa a povrchovou energií fázového rozhraní mezi pevným tělesem a plynem se nazývá povrchový tlak. Poté má Youngova rovnice tento tvar [10],[14]:

$$\gamma_L \cdot \cos\theta = \gamma_{S^0} - \pi - \gamma_{SL} \quad (19)$$

Velikost kontaktního úhlu θ se mění podle hodnot povrchového tlaku π . Tento vliv se uplatňuje u látek tuhých o vysoké hodnotě povrchové energie, která se adsorpcí snižuje. Mezi tyto látky řadíme např. křemen, sklo, kovové oxidy, kovy a anorganické soli [10],[14].



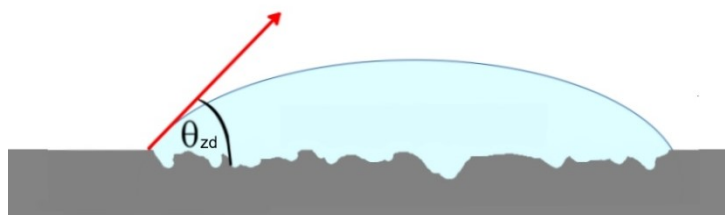
Obr. 4.3 Vliv adsorpce na úhel

4.2.3 Vliv chemické nehomogenity povrchu

Ideální pevný povrch je chemicky homogenní a dokonale rovný bez nečistot. K ideálně pevnému povrchu v reálném životě se nelze dopracovat. Jeho povrchovou energii totiž určuje jeho chemická struktura vrstev na povrchu. Jestliže mají tyto vrstvy na povrchu stejné chemické složení, označují se jako chemicky homogenní povrchy. V opačném případě, kdy jsou vrstvy rozdílného složení, označují se jako chemicky různorodé povrchy. Chemická heterogenita (různorodost) povrchu je zvláště důležitá vlastnost, která ovlivňuje adsorpci, smáčivost, adhezi a celkové chování povrchu. Protože všechny skutečné pevné povrchy jsou díky nečistotám drsné a chemicky různorodé, drsnost povrchu zaimplementoval do své úvahy Wenzel. Wenzelova rovnice charakterizuje kontaktní úhel na rovinných drsných površích.

$$\cos\theta = \varepsilon \cdot \cos\theta_{zd} \quad (20)$$

Kde ε je drsnost povrchu, θ_{zd} je smáčecí úhel na drsném pevném povrchu a θ je smáčecí úhel pro ideální povrch [10].

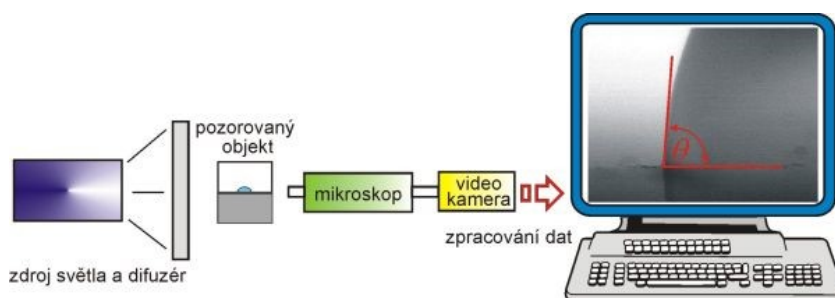


Obr. 4.4 Vliv drsnosti povrchu na úhel smáčení [15]

4.3 Stanovení smáčecího úhlu na nehomogenním povrchu

4.3.1 Drsný povrch

Při měření na drsném povrchu, např. organické a biologické materiály, je zjišťování smáčecích úhlů velmi obtížné. Z důvodu jejich energetické a morfologické různorodosti a malé velikosti kontaktních úhlů je jejich smáčecí linie nepravidelná. Naměřené hodnoty na takovýchto površích jsou nepřesné a nespolehlivé. Proto se vyvinula metoda ASDA-D, která se zaměřuje na průměr kapky a posléze přepočítává dle určitého vztahu. Kapka se umístí na zkoumaný drsný povrch a shora je pozorována mikroskopem a snímána video snímačem. Digitální signál je dále převáděn do počítače a je určen střední průměr kapky, který se známým povrchovým napětím kapaliny, objemem kapky, rozdílem hustot kapaliny a známým plynným okolím umožňuje vypočítat úhel smáčení [10].



Obr. 4.5 Měřicí schéma [14]

4.3.2 Tkaniny

Stanovení úhlu smáčení je nemožné klasickou metodou ani pomocí objemové metody. K měření úhlu smáčení na tkanině se využívají porovnávací metody neboli kvalitativní testy, kdy se měří čas, nebo se aplikují kapaliny s rozdílným povrchovým napětím. Je to způsobené velkým kolísáním smáčející linie vlivem prostorového pletení vláken ve tkanině. Jedním ze způsobů je postupné pokládání kapek různých kapalin o různém

povrchovém napětí a pozorování, u které kapaliny nastane úplné nesmáčení. Další možností je měření času, za který se ponoří kousek zkušební tkaniny, který je položen na povrch kapaliny. Při těchto metodách je velkou nevýhodou, že porovnávací procesy platí jenom pro tkaniny se stejnou velikostí pórů a strukturou. Tato podmínka se u tkanin velmi těžce dodržuje [17].

4.3.3 Práškový materiál

Měřená hodnota kontaktního úhlu je ovlivňována nerovnostmi a nehomogenitou povrchu. Aby se dalo měření kontaktního úhlu provést, musí se nejprve měřená sypká látka připravit, k tomu se používá lisovací metoda vytvářející tablety.

Metoda sedící kapky

V lisovaných tabletách zůstávají póry, do nichž proniká měřená kapalina, proto nelze aplikovat klasickou statickou metodu měření, ale musí se použít třeba metoda dynamická. U dynamického měření smáčecího úhlu se v krátkých intervalech měří měnící se kontaktní úhly. Díky nerovinné linii smáčení se musí měřit postupující i ustupující úhly zároveň. Výsledný kontaktní úhel se poté určí z aritmetického průměru jejich cosinů [10, 17].

$$\cos\theta_m = \frac{1}{2}(\cos\theta_a + \cos\theta_r) \quad (21)$$

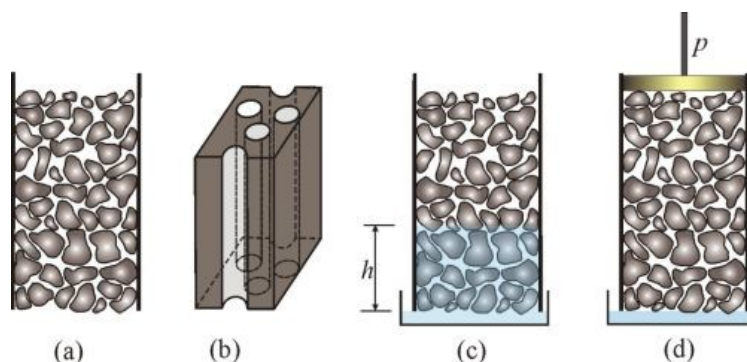
Metoda pronikání kapalné látky do sloupce práškového materiálu

Toto měření spočívá v určení tlaku p , který je potřebný k zamezení pronikání kapaliny do pórovitého, sypkého materiálu (obr 4.6 – varianta d). Protože nelze definovat nepravidelnou síť kanálků v sypkém materiálu, matematicky se zavádí zjednodušený model, kde se reálné kanály nahradí soustavou válcových pórů o určitém poloměru r (obr. 4.6 – varianta b):

$$p = \frac{2 \cdot \gamma_{LG} \cdot \cos\theta}{r} \quad (22)$$

Přestože je výpočet výrazně ulehčen zavedením teoretických válcových pórů, musí se určit právě onen poloměr. Neznámý poloměr se určuje podle převodu, kdy měřenou kapalinu nahradíme kapalinou, jež dokonale smáčí měřený práškový materiál, poté lze porovnávací metodou určit poloměr R . U měření se předpokládá, že je známo povrchové napětí kalibrační $(\gamma_{LG})_0$ i měřené kapaliny γ_{LG} . Tyto měřicí metody nejsou velmi spolehlivé, ale metoda pronikání kapaliny je přesnější než metoda sedící kapky [18].

$$\cos\theta = \frac{p}{p_0} \cdot \frac{(\gamma_{LG})_0}{\gamma_{LG}} \quad (23)$$



Obr. 4.6 Měřicí schéma [18]

Metoda rychlosti pronikající kapaliny do pórů

Tato metoda je závislá na měření rychlosti pronikající kapaliny do tuhé látky nebo sloupce lisovaného práškového materiálu. Tuto metodu popisuje Washburnova rovnice:

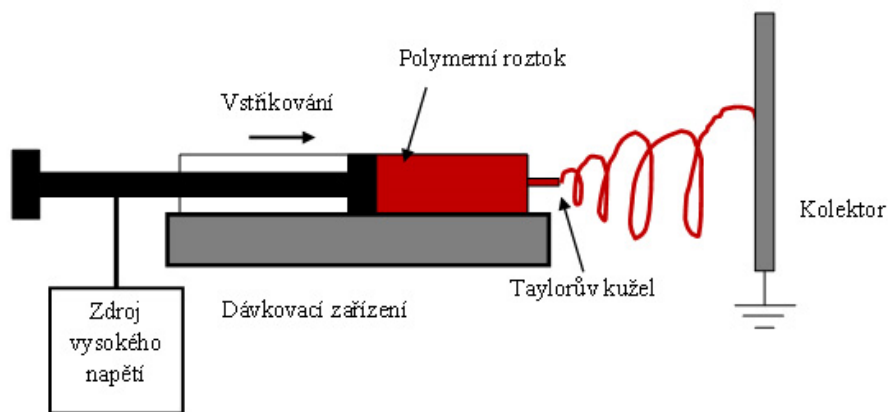
$$\frac{dh}{dt} = \frac{\gamma_{LG} \cdot R \cdot \cos\theta}{4 \cdot \eta \cdot h} \quad (24)$$

Z ní je zřejmé, že pronikající rychlost kapaliny do pórů dh/dt , kde h je výška pronikající kapaliny. Rovnici dále ovlivňuje povrchové napětí γ_{LG} , hodnotě smáčecího úhlu θ kapaliny, viskozitě η a na poloměru pórů R . Omezením pro tuto metodu je, že používaná kapalina musí alespoň částečně smáčet vzorkový povrch a musí být kontrolován stupeň slisování materiálu [18].

5 Praktické využití povrchového napětí v praxi

5.1 Tvorba nanovláken

U elektrostatické metody se snažíme překonat povrchové napětí formou vysokého napětí, kdy tryska je napájena vysokým napětím 10–30 kV, někdy i 80 kV. Do trysky je natlačován roztok polymeru tak, aby byl v přímém kontaktu s vysokým napětím. Jestliže je napětí dostatečně vysoké, indukuje náboj na povrchu kapky kapaliny a mění polokulovitý tvar kapky na Taylorův kužel. Pokud se napětí zvýší až ke kritické hodnotě, elektromagnetické síly překonají povrchové napětí Taylorova kužele. V tomto kritickém stavu se z povrchu kužele vypuzuje nabitý proud tekutiny. Proud tekutiny je dále přitahován ke kolektoru, který je uzemněný [19].



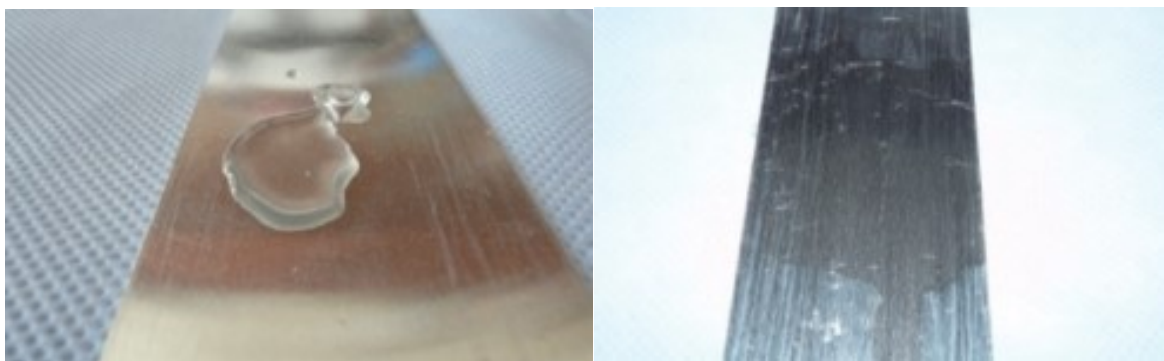
Obr. 5.1 Princip elektrostatického zvlákňování [20]

5.2 U povrchových úprav

Pomocí ovlivnění povrchové energie jsme schopni dosáhnout lepších výsledků u povrchových úprav různých materiálů.

5.2.1 Zvýšení povrchové energie

Ke zvýšení povrchové energie používáme např. plazmu. Při aplikaci plazmatu lze dosáhnout vyšší přilnavosti povrchu. To nám umožňuje použít menší počet potřebných nátěrů např. u dřeva a plastu, snížit množství defektů povrchu. Zvýšením povrchové energie jsme schopni povrch upravit tak, aby byl blíže k ideálně požadovanému povrchu.



Obr. 5.2 Před a po aplikaci plazmy [20]

5.2.2 Snížení povrchového napětí

Sníčováním povrchového napětí dosahujeme hydrofobity povrchu. Hydrofobitou dosahujeme například zvýšení odolnosti proti korozi, snížení nasákavosti u porézních materiálů, snížení špinivosti atd. [21].



Obr. 5.3 Papír po aplikaci nanoskla [20]

5.3 Hydrofobní impregnace betonu

Nano impregnace stavebních povrchů, především betonu, je velmi účinná metoda k preventivnímu ošetření před povětrnostními vlivy a nežádoucím zašpiněním. Betonový povrch je tvořen mikroskopickými kapilárami, v nichž povětrnostní vlivy působí škody. Často se stává, že do těchto kapilár nateče voda, která následně zmrzne a vlivem svojí roztažnosti při změně skupenství hrubě poškodí povrch. Proto se tyto porézní materiály začaly impregnovat. Povrch porézních materiálů je ošetřován buďto hydrofobizací, povlakem nebo impregnací.

Podstatou úpravy povrchu je vytvořit vodoodpudivý povrch, který způsobí zvýšení smáčecího úhlu. Když se tedy na vnitřní povrch kapilár nanese hydrofobní povrch, kapalina přestane smáčet a hůře proniká do kapilár, nebo neproniká vůbec [21].



Obr. 5.4 Druhy úprav povrchu [21]

Praktická část

Fyzikální vlastnosti kapalin při experimentu

Protože jsem oba experimenty prováděl za konstantní teploty 23 °C, definuji základní fyzikální vlastnosti použitých kapalin.

Tab. 5.1 Fyzikální vlastnosti kapalin použitých v experimentu při 23 °C

Veličina	Olej	Voda	Jednotka
Hustota (ρ)	878	998	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Dynamická viskozita (η)	0,11	$1,002\cdot 10^{-3}$	$\text{Pa}\cdot\text{s}$
Kinematická viskozita (ν)	125	$1,004\cdot 10^{-6}$	$\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$
Povrchové napětí (σ)	33	$72,75\cdot 10^{-3}$	$\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$

Výrobce oleje, který používám, neuvádí hodnotu povrchového napětí. Proto jsem oleji přiřadil podobnou hodnotu povrchového napětí, a to hodnotu olivového oleje (viz tab. 3.1).

6 Určení úhlu smáčení pro různé povrchy

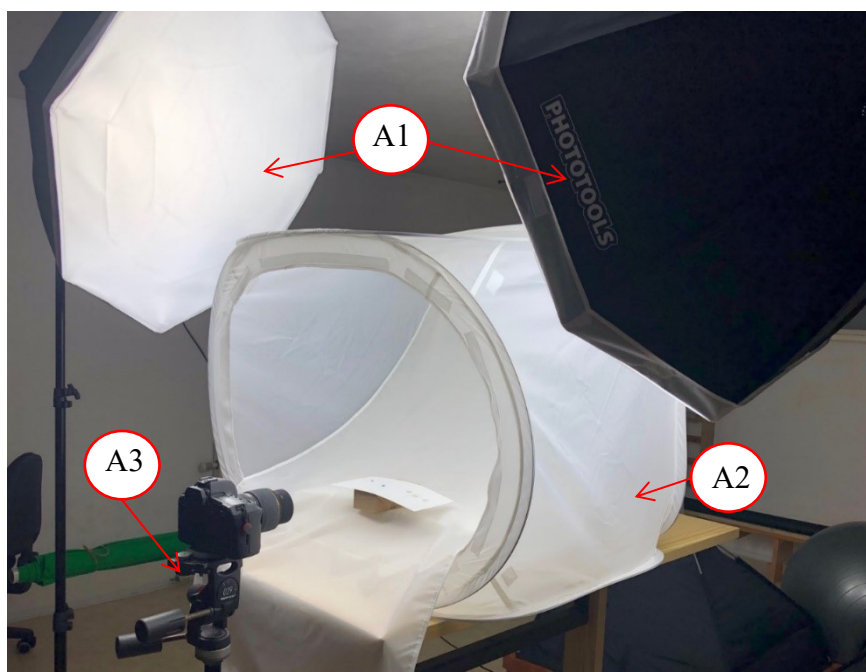
Cílem této úlohy je zjistit úhel smáčení a smáčivost v kombinacích mezi kapalinami a různými povrchy.

V předchozích kapitolách jsem se věnoval Youngově rovnici a teorii o smáčecích úhlech. Popsal jsem, proč jsou vědomosti o smáčení a povrchovém napětí důležité. Proto jsem provedl experiment a na různé povrchy jsem nanesl kapku oleje nebo vody a zaznamenal na fotografii. Následně jsem vyhodnotil smáčecí úhel a určil jsem, jestli kapalina povrch smáčí dokonale, dobře nebo špatně viz tab. 6.2 a 6.4

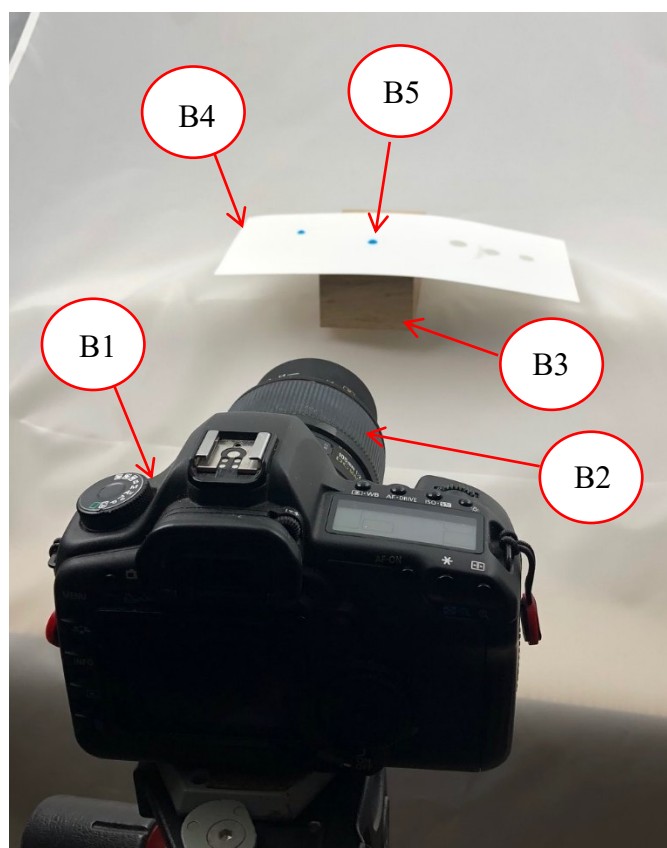
6.1 Popis experimentu

Experiment předpokládá potřebné vybavení (obr. 6.1 a 6.2):

- digitální fotoaparát,
- makro objektiv,
- stativ na fotoaparát,
- bílý fotografický stan,
- vhodné osvětlení,
- podložení pro vybrané povrchy,
- zkoumané povrchy,
- zkoumané kapaliny (olej a voda),
- barvivo,
- kapátko.



Obr. 6.1 Stanoviště pro záznam smáčecího úhlu, A1 – vhodné osvětlení, A2 – fotografický stan, A3 – stativ na fotoaparát



Obr. 6.2 Detail podložky, B1 – digitální fotoaparát, B2 – makro objektiv, B3 – podložka, B4 – zkoumaný povrch, B5 – zkoumaná kapalina

6.1.1 Použité povrchy

- křídový papír,
- sklo,
- dřevo,
- karton,
- umakart,
- látka,
- impregnovaná látka.

Materiály jsem volil dle vlastního úsudku a snažil se splnit škálu od vysoce porézních materiálů (dřevo, látka) až po téměř dokonale hladké (sklo, umakart). Aby byl pokus proveden správně, je potřeba všechny materiály očistit od nečistot a mastnoty.

6.1.2 Použité kapaliny

- hydraulický olej renolit VG46,
- voda.

Tyto dvě kapaliny jsem zvolil z důvodu jejich rozličných fyzikálních vlastností. Pro lepší reprezentování smáčecího úhlu jsem vodu obarvil potravinářským barvivem do odstínů modré barvy. Hydraulický olej jsem nijak upravovat nemusel, protože jeho přirozená barva je odstín žluté. Kapaliny musely být přemísťovány a aplikovány v uzavřených čistých nádobách pro omezení vnější kontaminace.

6.1.3 Potřebné vybavení

- digitální fotoaparát,
- makro objektiv,
- stativ na fotoaparát,
- bílý fotografický stan,
- vhodné osvětlení,
- podložení pro vybrané povrchy,
- zkoumané povrchy,
- zkoumané kapaliny (olej a voda),
- barvivo,
- kapátko.

6.2 Postup při určování úhlů smáčení

Pořízené snímky jsem chtěl mít kvalitní, esteticky působivé a vhodné pro následnou interpretaci smáčecích úhlů. Proto jsem si vybral kvalitní fotoaparát s vhodným objektivem a jako pozadí jsem zvolil bílý fotografický stan, který je určen přímo pro fotografické účely.

1. Na fotoaparát jsem našrouboval makro objektiv, na kterém jsem vypnul automatické ostření. Zásunul jsem paměťovou kartu a baterii. Zkontroloval jsem čistotu objektivu a ostatních čoček. Na fotoaparátu jsem nastavil manuální režim, sekvenční focení, zakázal automatické používání blesku, nastavil iso a podobně. Formát ukládaného záznamu jsem zvolil RAW.



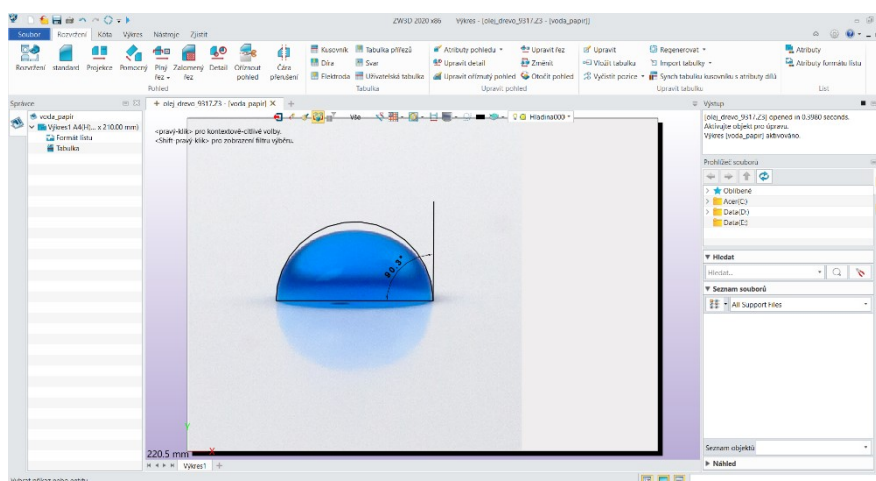
Obr. 6.3 Použitý makro objektiv [23]

2. Kompletní fotoaparát jsem upevnil na stativ, který byl ve výšce pro mě pohodlné. Fotografický stan si ustavím do výšky, kdy je dno stanu o něco níže než osa objektivu. Okolo fotografického stanu jsem rozprostřel osvětlení tak, aby dno stanu bylo zcela osvětlené bez žádného stínu.
3. Každý zkoumaný povrch má jinou výšku, proto si zvolím vhodné podložky, aby byla splněna souosost osy s rovinou zkoumaného povrchu. Kvůli kontrastu vmíchám do vody barvivo a důkladně promíchám. Obě kapaliny si připravím do kapátek.
4. Zkoumaný povrch vložím do stanu na podložku. Zkontroluji souosost, nastavím fotoaparát do předpokládaného místa zkoumání. Do předpokládaného místa umístím tužku, nastavím si hloubku ostrosti na objektivu, lehce si na povrchu vyznačím zaostřené místo.
5. Fotoaparát si namáčknutím tlačítka zaostřím a připravím k záznamu, kapátkem nanesu kapku kapaliny na vyznačené místo a pořídím záznam. Pořízenou sekvenci ihned přesouvám do počítače, zkontroluji výsledky a vyberu nejlepší fotografii. V případě, že ani jeden ze snímků není vhodný, postup od bodu 4 opakuji.
6. Postup od bodu 4 opakuji pro každý zkoumaný povrch.

7. Pro vyhodnocení smáčecího úhlu jsem použil CAD software. Cílem bylo, aby kapka byla ostrá a pozadí rozmazané, proto musela být nastavená nízká clona objektivu, přesněji 2,8. Proto jsem musel velice přesně stanovit místo, kde kapku umístím a na toto místo bylo zaostřeno. Sekvence byla 4 snímky za sekundu.

6.3 Metodika vyhodnocení

1. Pro vyhodnocení smáčecího úhlů jsem použil software zw3D verzi Custom, ve kterém jsem si založil nový multiobjekt, v něm jsem pro každou jednotlivou fotografii vytvořil výkres.
2. Do výkresu jsem importoval zkoumanou fotografii jako formát JPG.
3. Určil jsem si dva nejvzdálenější body na fázovém rozhraní mezi pevným povrchem a kapalinou. Tyto dva body jsem propojil úsečkou.
4. Pro získání tečného úhlu mezi rovinou povrchu a křivkou povrchu kapaliny jsem musel získat referenci o tvaru paraboly. Kapka nemá pravidelný tvar, a to především pro povrchy, které špatně smáčí. Proto jsem neopisoval celý tvar kapky, ale pouze tu část, ze které můžu reprezentovat smáčecí úhel.
5. K vytvoření křivky oblouku nebo kružnice jsem vytvořil tečnu z bodu rovinného povrchu. Vytvořil jsem úhlovou kótu mezi úsečkou a tečnou. Tento nalezený úhel je hledaný smáčecí úhel.



Obr. 6.4 Vyhodnocení úhlu smáčení

6.4 Vyhodnocení měření

Ve vyhodnocení jsem vždy zobrazil kapku dané kapaliny a určený úhel smáčivosti. Vše je následně shrnuto v tabulce 6.2 a 6.4. Aby objem všech kapek by přibližně stejný, nanášel jsem je stejným způsobem.

6.4.1 Smáčecí úhly pro olej


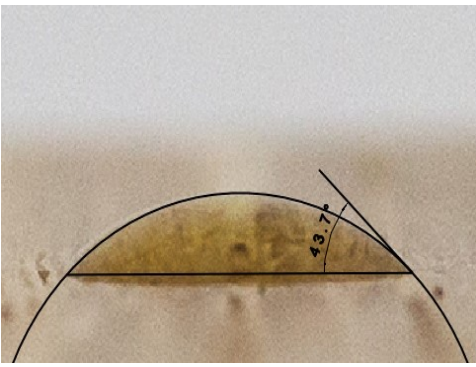

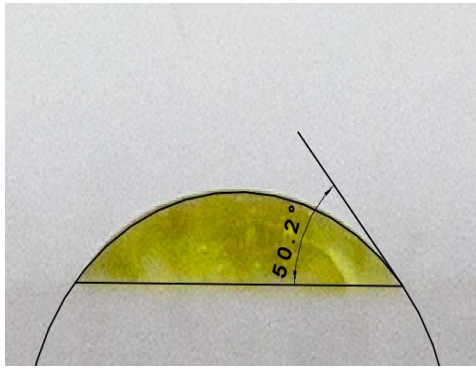
Z tabulky 6.2 je patrné, že pro hladké povrchy (sklo) jsou smáčecí úhly menší než pro povrchy drsné (karton). Všechny povrchy jsou hydrofilní, to znamená, že povrch smáčeji dobře.

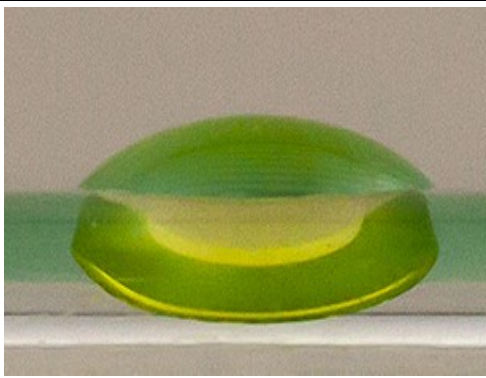
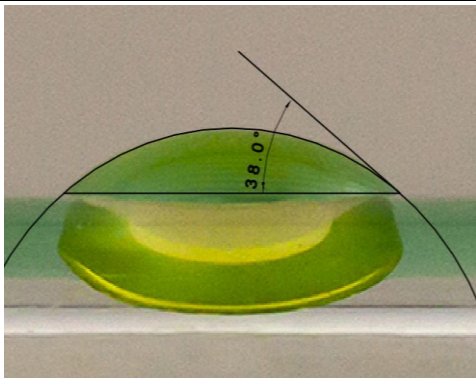

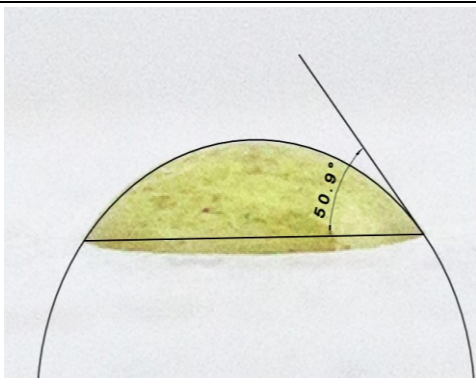
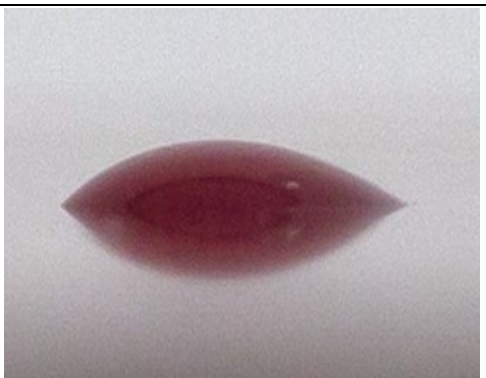
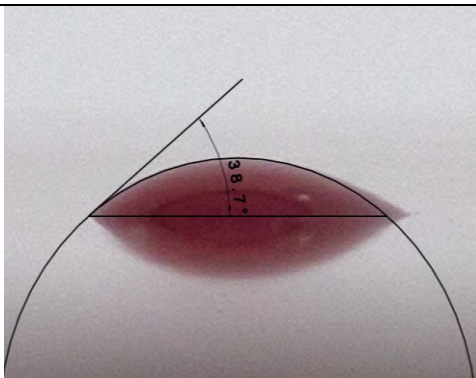
Tab. 6.1 Výsledky vyhodnocení experimentu pro olej

Použité povrchy	Smáčecí úhly smáčení pro olej	Smáčení	Povrch
Křídový papír	50,2°	dobré	hydrofilní
Sklo	38°	dobré	hydrofilní
Dřevo	43,7°	dobré	hydrofilní
Karton	50,9°	dobré	hydrofilní
Umakart	38,7°	dobré	hydrofilní
Látka	nevyhodnoceno		
Impregnovaná látka	nevyhodnoceno		

V tabulce 6.3 jsou zobrazeny kapky oleje a vyhodnocení úhlu smáčivosti. Pro olej nebyl vyhodnocen látkový povrch, protože se olej vsakoval velmi rychle a úhel se mi nepodařilo zachytit.

Tab. 6.2 Vyhodnocení experimentu pro olej

Povrch	Fotografie	Vyhodnocení
Dřevo		
Křídový papír		

Sklo		
Karton		
Umakart		

6.4.2 Smáčecí úhly pro vodu

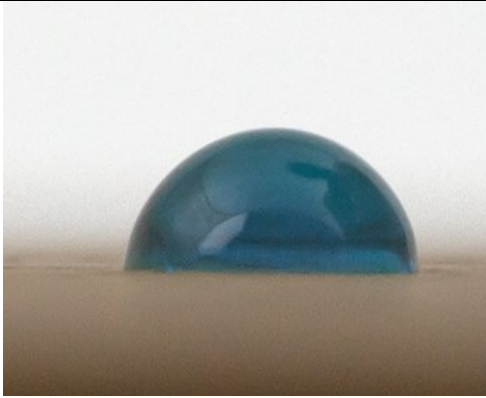
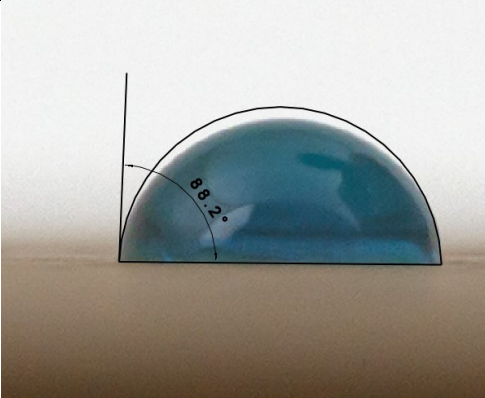

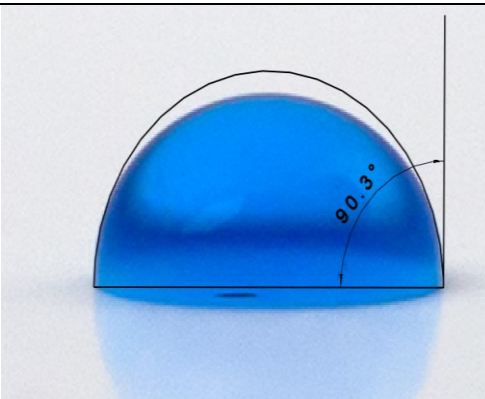
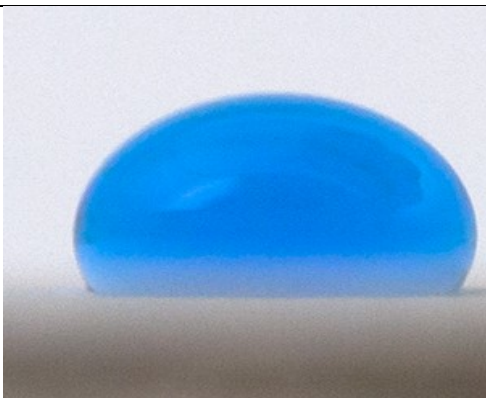
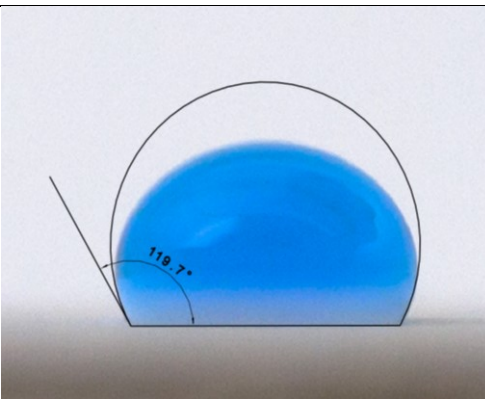
V tabulce 6.4 jsem zobrazil kapky vody a vyhodnotil úhel smáčení.


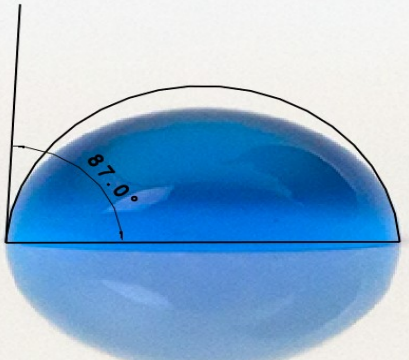

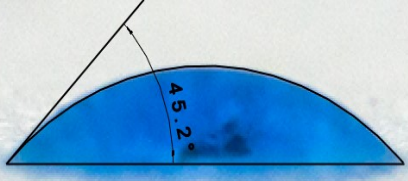

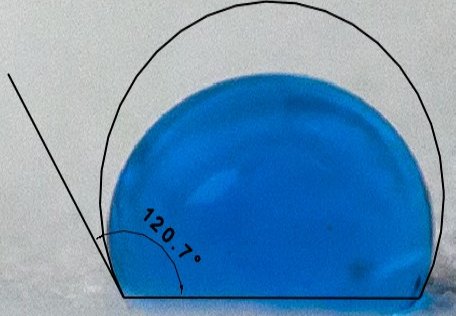


Tab. 6.3 Výsledky vyhodnocení experimentu pro vodu

Použité povrchy	Smáčecí úhly smáčení pro vodu	Smáčení	Povrch
Dřevo	88,2°	dobré	hydrofilní
Křídový papír	90,3°	špatné	hydrofobní
Karton	119,7°	špatné	hydrofobní
Umakart	87°	dobré	hydrofilní
Látka	45,2°	dobré	hydrofilní
Impregnovaná látka	120,7°	špatné	hydrofobní
Sklo	12,7°	dokonalé	hydrofilní

Oproti experimentu, kdy byl použit olej, jsou smáčecí úhly rozmanitější. S výjimkou kombinace, kdy bylo jako zkoumaný povrch sklo, lze konstatovat, že smáčecí úhly pro vodu dosahují vyšších hodnot než pro olej. U obou variant experimentu dosahuje nejvyššího smáčecího úhlu karton.

Tab. 6.4 Vyhodnocení experimentu pro vodu

Povrch	Fotografie	Vyhodnocení
Dřevo		
Křídový papír		
Karton		

Umakart		
Látka		
Impregnová na látka		
Sklo		

6.5 Závěr

V tomto experimentu jsem se zabýval smáčecím úhlem mezi různými povrchy a kapalinami. Experiment jsem provedl v ateliéru za konstantních okolních podmínek. Všechny zkoumané povrchy jsem řádně očistil a odmastil. Kapaliny jsem přenášel a aplikoval tak, abych zabránil vnější kontaminaci. Samotný pokus byl komplikovaný, protože některé povrchy jsou porézní a kapaliny se do nich rychle vsakovaly, proto zaznamenávání muselo probíhat velmi rychle. Další problém byl v ostření objektivu, kdy makro objektiv musel být ostřen ručně a hloubka ostrosti byla velice citlivá. Po překonání těchto problémů jsem zaznamenal sérii fotografií smáčecích povrchů a následně vyhodnotil smáčecí úhel. Po jednotlivých vyhodnoceních a vzdálenějším pohledu na výsledky si lze všimnout, že voda má na stejných površích větší úhly smáčivosti s výjimkou, kdy jsem aplikoval vodu na sklo, a zde se prokázala dokonalá smáčivost. To, že voda povrchy smáčí dobře až špatně, je v hydraulice cenný poznatek především pro tematiku ztrát a tření v hydraulických obvodech. V hydraulických obvodech se totiž většinou setkávám s hydraulickým olejem místo vody. Lze říci, že čím kapalina povrch smáčí hůře, tím menší jsou ztráty v obvodu.

7 Monitorování kapky pomocí vysokorychlostní kamery

Cílem tohoto experimentu je monitorování dráhy a tvaru kapky od vypuštění až po ukončení všech viditelných reakcí. Tyto děje jsem zaznamenával pomocí vysokorychlostní kamery při snímkové frekvenci 10 000 fps. Pro experiment letící kapky je potřeba znát problematiku volného pádu, kde vypočítám dobu letu pomocí dráhy a času. Abych byl schopen spočítat hmotnost kapky a poté porovnat jednotlivé kombinace podle energie při dopadu, musím znát hustotu, z níž se vypočítá hmotnost kapky (viz tabulka 6.1).

Experiment jsem vytvořil kvůli propagaci dané vysokorychlostní kamery. Proto jsem se snažil po celou dobu měření držet zásad, která by měly estetičnost udržet v konstantní rovině.

7.1 Popis experimentu

7.1.1 Použité kapaliny

- voda,
- hydraulický olej RENOLIT VG46.

Výběr kapalin jsem zohledňoval vzhledem k předešlému experimentu. Tyto dvě kapaliny jsem zvolil kvůli jejím odlišným fyzikálním a chemickým vlastnostem. Největší důraz jsem kladl na velikost mezimolekulárních sil, kdy se každá kapalina bude při narušení jejich silové rovnováhy chovat odlišně.

7.1.2 Použité povrchy pro dopad

- voda,
- hydraulický olej RENOLIT VG46,
- písek,
- dřevo,
- plexisklo,
- sklo.

Použité povrchy jsem vybíral podle dostupnosti a různorodosti. Pro dopad jsem vybral povrchy kapalně, pevně i sypké. Povrchy jsem vybíral takové, aby provedený experiment dosáhl co možná největší viditelné reakce.

7.1.3 Použité varianty

Tab. 7.1 Zkoumané varianty

Číslo varianty	Kapalina	Povrch
1	Voda	Voda
2	voda	Olej
3	olej	Voda
4	Olej	Olej
5	Olej	Písek
6	Olej	Dřevo
7	Olej	Plexisklo
8	Olej	Sklo
9	Voda	Sklo
10	Voda	Písek
11	Voda	Dřevo
12	Voda	Plexisklo

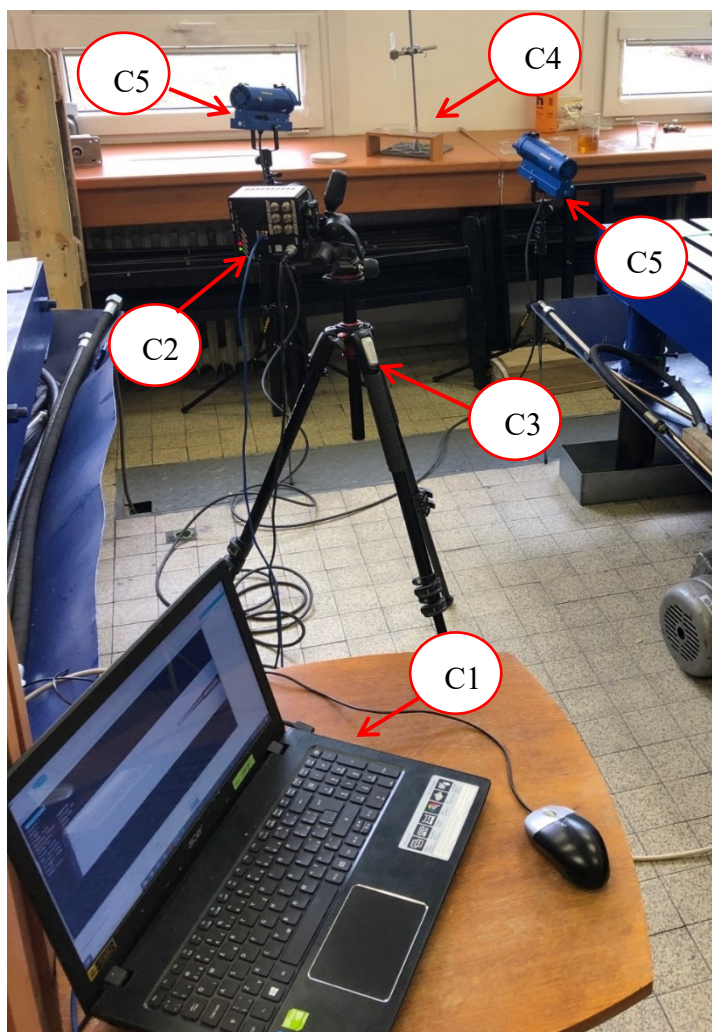
7.1.4 Pracoviště

Pracoviště jsem rozdělil na dvě části. První sloužilo pro záznam experimentu a druhé pro vykonání experimentu.

První pracoviště

V první části pracoviště se nachází (viz obr. 7.1):

- stativ na vysokorychlostní kameru,
- vysokorychlostní kamera Photron UX50 mini,
- 2× stativ na pomocné osvětlení,
- 2× halogenové pomocné světelné lampy,
- 1× manuálně ovládaný světelný stmívač,
- PC,
- potřebná kabeláž.

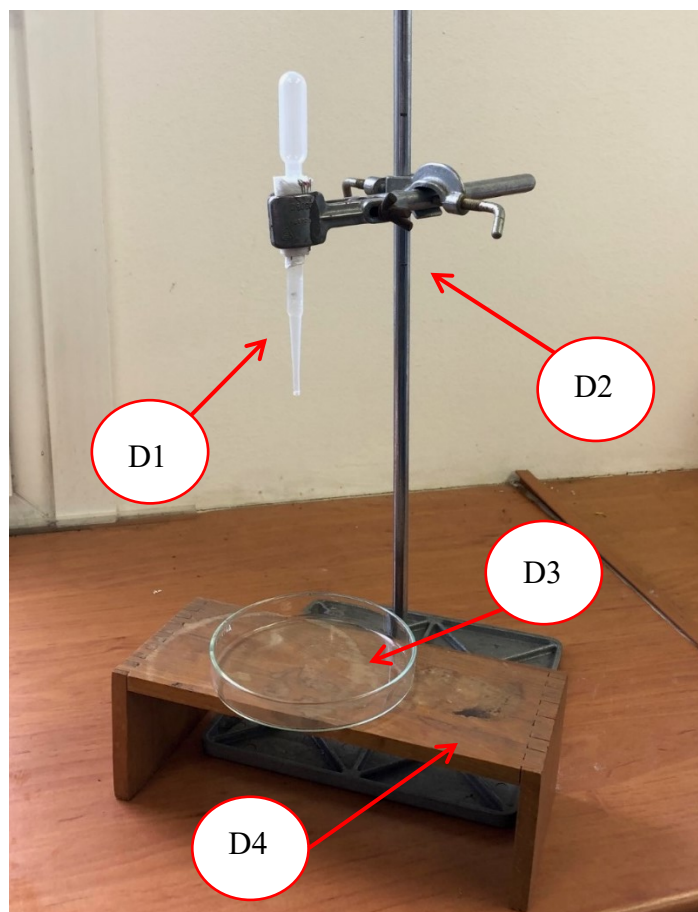


Obr. 7.1 První stanoviště pořizující záznam, C1 – PC, C2 – vysokorychlostní kamera, C3 – stativ pro vysokorychlostní kameru, C4 – pracoviště č. 2, C5 – osvětlení

Druhé pracoviště

V druhé části se nachází (viz obr. 7.2):

- stojan,
- držák na kapátko,
- Pasteurova pipeta (kapátko),
- Petriho miska a jiné laboratorní příslušenství,
- podstavce, na které umístím laboratorní příslušenství.



Obr. 7.2 Druhé stanoviště pro vykonání experimentu, D1 – Pasteurova pipeta (kapátko), D2 – stojan s držákem na kapátko, D3 – Petriho miska, D4 – podstavec

7.2 Postup měření

1. Aby naměřené výsledky a natočená videa byly esteticky na úrovni a výsledky šly zřetelně odečítat v následné postprodukci, musím si najít čisté pracoviště, nejlépe s bílým pozadím a bez jakéhokoli vzoru, s možností regulace venkovního světla.
2. Na mnou vybrané místo umístím stojan na kapátko tak, aby v pozadí byla bílá barva bez jakéhokoli vzoru. Do předpokládané výšky na stojanu připevním držák na kapátko, do něhož připevním samotné kapátko. Pod něj umístím dřevěný podstavec a prázdnou Petriho misku.
3. Rozložím stativ na kameru, na něj kameru připevním. Z kamery sundám všechny ochranné kryty a našroubuji objektiv. Kameru se stativem umístím do mnou odhadnuté vzdálenosti od zkoumaného objektu a pomocí aretace nastavím její svislou a horizontální polohu.
4. Připojím PC ke kameře, zapnu a spustím program PFV4. Zapnutou kameru propojím s PC přes síťový UTP kabel. Na PC vypnu všechny firewally a pomocí IP adresy „spáruji“ PC s kamerou. Program přepnu do režimu LIVE,

kde vidím živý náhled do hledáčku kamery. Objektiv ručně zaostřím a přiblížím nebo oddálím podle potřeby. Kvůli změně rozlišení při nastavení snímkovací frekvence si frekvenci nastavím na 10000 Fps. Poté v programu zapnu přisvětlovací mód a s kamerou otáčím tak dlouho, dokud na displeji neuvidím mnou zkoumanou laboratorní sestavu. Kameru ustavím do požadovaného směru a přisvětlovací mód vypnu.

5. Stativy na světla rozložím a na ně připevním světelné lampy. Rozložím a propojím světelný stmívač s lampami. Stmívač zapnu a intenzitu nastavím na nejvyšší stupeň a poté nechám lampy zahřát. Lampy uchycené na stativěch a laboratorní soustavu postavím do tvaru trojúhelníku. Lampy nastavím tak, aby co nejlépe osvětlovaly mnou zkoumané místo.
6. Do zkoumané soustavy umístím pravítko a vytvořím snapshot, který v postprodukcí poslouží k definování měřítka.
7. Vytvořím zkušební video, ve kterém hledám nežádoucí vjemy jako: odlesky, tmavá místa, ostrost, stíny, plynulost videa atd. Je-li vše v pořádku, můžu započít experiment, ve kterém vytvořím videa a fotografie podle potřeby.
8. V případě výměny kapátka s kapalinou (voda, olej) opakuji kalibrační proces, tedy bod 3 až 8.

7.3 Metodika vyhodnocení

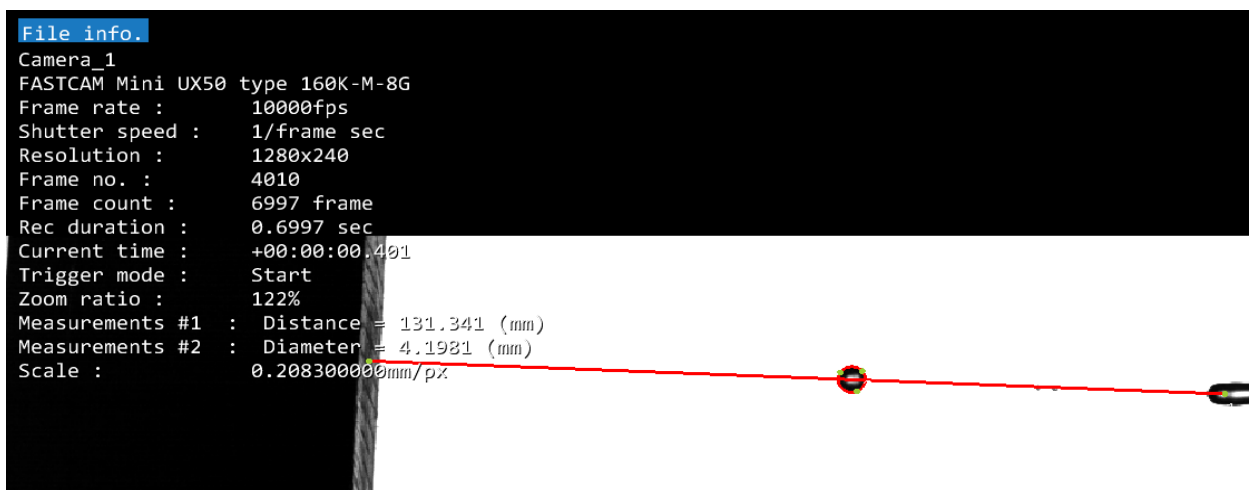
Postup měření se vztahuje k získání potřebných dat k následnému vyhodnocení. Samostatné vyhodnocení poté probíhá ve virtuálním prostředí v počítači. K vyhodnocení jsem použil program PFV4 (verze 1.5.3 E) a pro zaznamenání dat Microsoft Excel.

1. Abych byl schopen získat údaje o vzdálenostech a rádiích, musel jsem si pořízený záznam měřítka importovat do programu PFV4. Logika programu je, že z mnou určené a zakreslené skutečné vzdálenosti program vyhodnotí množství pixelů, které reprezentují skutečnou vzdálenost. V programu tedy zakreslím skutečných 10 mm a program mi vyhodnotí, že jeden pixel má velikost 0,2083. Tuto hodnotu jsem si zapsal a následně aplikoval na všechna videa, která jsou odvozená od stejného snímku měřítka.



Obr. 7.3 Zakreslení skutečné vzdálenosti v programu

2. Přehraji si video a určím si snímky, na kterých je vidět, kdy kapka vychází z kapátka, kapka letí a její tvar je nejvíce zakulacen a dopad kapky. Čísla těchto snímků si zapamatuji pro příští vyhodnocování dráhy a průměru kapky.
3. Pro určení velikosti dráhy použiji funkci měření, kterou program disponuje. Zvolím počáteční a koncový bod úsečky, tedy vypuštění kapky a její dopad, která reprezentuje dráhu. Program mi sám vyhodnotí skutečný výsledek. Pro výpočet průměru kapky použiji také funkce měření, akorát místo úsečky použiji kružnici tvořenou třemi body. Každý jednotlivý bod umístím na okraj kapky, která se ve 2D prostoru reprezentuje jako kružnice.



Obr. 7.4 Vyhodnocení dráhy a průměru

4. Dále jsem si určil objem, hmotnost a povrch kapky. Objem a povrch jsem zjistil pomocí jednoduchého vzorce pro výpočet objemu a povrchu koule pomocí průměru. Hmotnost jsem vypočítal pro každou kapalinu zvlášť tak, že jsem objem vynásobil hustotou.

Výpočet povrchu:

$$P = 4 \cdot \pi \cdot (r^2) \quad (24)$$

Výpočet objemu:

$$V = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \quad (25)$$

Výpočet hmotnosti:

$$m = V \cdot \rho \quad (26)$$

5. Video jsem si rozdělil na jednotlivé úseky. Protože je každé jiné, musel jsem každé individuálně rozčlenit a jednotlivé úseky pojmenovat. Každé video ovšem obsahuje stejný základ, tedy vypuštění, let a dopad kapky. U jednotlivých úseků jsem zaznamenal dobu jejich trvání a časovou posloupnost.

6. Doba letu jsem vypočítal ze vzorce pro volný pád a porovnávám ji s hodnotou vypočítanou z měření. Z vypočtené doby a dráhy vyhodnotím rychlost padající kapky.
7. Z jednotlivých úseků videa vytvořím obrázky, které přiřadím k jednotlivým časovým průběhům a názvům.

7.4 Vyhodnocení experimentu

Během experimentu jsem zaznamenal a vyhodnotil celkem 12 videí. Vybral jsem tedy 4 videa, která jsou nejzajímavější a nejlépe reprezentují můj cíl experimentu. Vybral jsem variantu 1, 2, 3 a 10 viz tabulka 7.1. V hlavní textové části práce jsem popsal variantu 1, varianty 2, 3 a 10 jsem uvedl v příloze.

7.4.1 Varianta 1

Ve variantě 1 jsem použil vodu pro obě média, tedy povrch i kapka byly tvořeny vodou. Toto video se jeví nejzajímavější, protože proběhla i sekundární reakce, kdy se povrch rozvlnil a odražené vlny se setkaly v počátečním bodě. Toto zapříčinilo výtrysk sekundární kapky mimo fázové rozhraní kapaliny. Měřítka byla použita 1 viz. příloha.

Tab. 7.2 Vyhodnocení měřených a vypočtených hodnot varianty 1

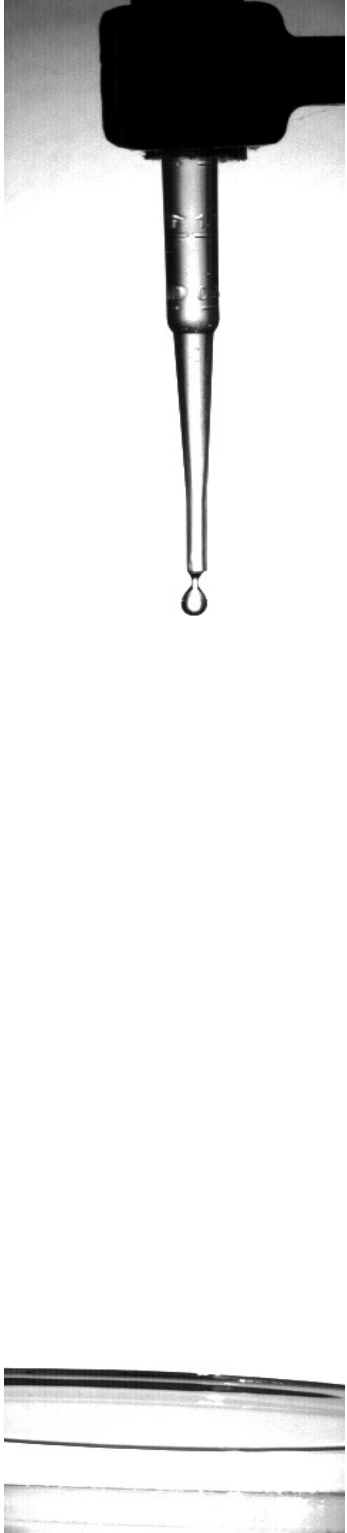


Varianta 1			
Měřitelné veličiny			
Veličina	značení	hodnota	jednotka
Dráha kapky	s	0,1478	m
Hustota	ρ	998	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Doba letu teoretická	t	0,17	s
Doba letu pozorována	t	0,16	s
Rychlost letu	v	1,70	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
Gravitační zrychlení	g	9,81	$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$
Kapka			
Průměr kapky	d	4,14	mm
Povrch kapky	P	53,95	mm^2
Objem kapky	V	37,26	mm^3
Hmotnost kapky	m	371,91	mg







Doba letu pozorována je určena mým pozorováním z videa. Tento úsek jsem určil od okamžiku, kdy se kapka utrhla od kapátka do okamžiku, kdy se dotkla dopadového povrchu. Teoretickou dobu letu jsem vypočítal podle teorie volného pádu.







Výpočet doby letu:

$$t = \sqrt{\frac{2s}{g}} \quad (27)$$

Tab. 7.3 Vybrané okamžiky pozorování

Vybrané okamžiky pozorování		
Vypuštění kapky (A)	Let kapky (B)	Prvotní dopad (C)
		

Vybrané okamžiky pozorování		
Nejvyšší první kráter (D)	Započetí sekundární reakce (E)	Sekundární výtrysk (F)
		
		

Vybrané okamžiky pozorování		
Změna směru kapky (G)	Dopad sekundární kapky (H)	Konec viditelných reakcí (I)
 	 	 

Časový průběh experimentu:

Tab. 7.4 Časový průběh varianty 1

Úseky	Doba průběhu děje [s]	Reálný čas [s]
vypuštění kapky	0	0
let kapky		0,1237
prvotní dopad	0,1237	0,1237
nejvyšší první kráter	0,0069	0,1306
započetí sekundární reakce	0,0273	0,1579
sekundární výtrysk	0,0344	0,1923
změna směru sekundární kapky	0,0886	0,2809
dopad sekundární kapky	0,1255	0,4064
konec viditelných reakcí	0,0237	0,4301

V tabulce 7.4 jsem znázornil časové průběhy. Ve sloupci „doba průběhu děje“ jsem zaznamenal, jak dlouho daný děj trval. Ve sloupci „reálný čas“ jsem zapsal časovou posloupnost všech úseků.

Vypuštění kapky (A)

Moment, kdy se utrhne kapalina od hrdla kapátka.

Let kapky (B)

Doba, od utržení kapaliny až po dopad na povrch.

První dopad (C)

Okamžik, kdy kapka dopadne na sledovaný povrch.

Nejvyšší první kráter (D)

Moment, kdy vlnění dosáhne nejvyšší amplitudy.

Započetí sekundární reakce (E)

Chvilé, kdy se setkávají odražené vlny od okraje nádoby.

Sekundární výtrysk (F)

Okamžik, při kterém se energie odražených vln sečte a do vzduchu je vymrštěna sekundární kapka.

Změna směru sekundární kapky (G)

Moment, ve kterém sekundární kapka začne měnit směr a začne padat směrem dolů.

Dopad sekundární kapky (H)

Chvíle, kdy sekundární kapka dopadne zpátky na povrch.

Konec viditelných reakcí (I)

V tomto okamžiku neprobíhá žádná viditelná reakce kromě mírného vlnění na povrchu kapaliny.

8 Závěr

V úvodní části práce jsem zpracoval teorii o vysokorychlostních kamerách a všeobecné informace ohledně digitálního záznamu. Dále se věnuji problematice povrchového napětí a smáčení, kde jsem vysvětlil základní pojmy. Poslední kapitolu jsem věnoval praktickému využití povrchového napětí v praxi.

V praktické části této práce jsem se v prvním experimentu zabýval problematikou smáčivosti, kdy jsem na různé povrchy nanесl kapku kapaliny a vyfotografoval. Z fotografií jsem vyhodnotil smáčecí úhly a všechny vzájemné kombinace. Zjistil jsem, že olejem smáčené povrchy jsou všechny hydrofilní, tedy dobře smáčí (viz tabulka 6.2). Voda oproti oleji smáčí povrchy podstatně hůře, velká část zkoumané skupiny povrchu při nanesení kapky vody vytvoří hydrofobní reakci, kdy je úhel smáčení větší než 90° (viz tabulka 6.4). Lze konstatovat, že voda všeobecně smáčí různé povrchy hůře než olej. Výjimkou je kombinace skla a vody, při které byl smáčecí úhel $12,7^\circ$, což je téměř dokonalé smáčení a voda na povrchu vytvořila namísto kapky souvislou vrstvu. Smáčení je ovlivněno povrchovým napětím kapaliny a materiálu, který je smáčen.

V druhém experimentu jsem monitoroval chování kapky při pádu a dopadu. Vytvořil jsem sérii 12 videí, ve kterých jsem kapal vodu nebo olej na různé povrchy. Povrchy pro dopad byly z kapalného, pevného nebo sypkého materiálu. Nejzajímavější byla kombinace, kdy jsem kapal kapku vody do vody, kdy došlo k sekundární reakci a kapalina díky svému vysokému povrchovému napětí se dokázala rozvlnit tak, že vymrštila druhou, menší kapku. Každé video disponuje jedinečnými záběry, které reprezentují daný povrch. Obecně lze pro povrchy tvořené kapalinou říct, že čím větší povrchové napětí kapalina má, tím zajímavější a rozsáhlejší bude mít reakci. Video lze použít jako propagační materiál. Z videí je jednoznačně patrné, že kapka vody i oleje má kulovitý tvar.

9 Seznam použité literatury

- [1] Motion Engineering Company. About High Speed Cameras. *Highspeed imaging.com* [online]. © 2019 [cit. 2020-04-08]. Dostupné z: <http://www.highspeedimaging.com/about-high-speed-cameras/>
- [2] HUDEČEK, Jan. *Možné aplikace vysokorychlostních kamer v průmyslu*. Brno, 2013. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Jana Doňarová.
- [3] PLAŠTIAK, Martin. Mercedes-Benz třídy B - Crash test Euro NCAP. In: *Autoweb.cz* [online]. 26. 11. 2011 [cit. 2020-04-08]. Dostupné z: <https://www.autoweb.cz/mercedes-benz-tridy-b-crash-test-euro-ncap/>
- [4] SVOBODA, Jiří. Digitální vysokorychlostní kamery pro výrobní linky. In: *Odbornecasopisy.cz* [online]. © 2019 [cit. 2020-04-08]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/digitalni-vysokorychlostni-kamery-pro-vyrobní-linky--13852>
- [5] HARDESTY, Larry. Trillion-frame-per-second video. In: *News.mit.edu* [online]. 13. 12. 2011 [cit. 2020-04-08]. Dostupné z: <http://news.mit.edu/2011/trillion-fps-camera-1213>
- [6] FRAME, Adam. Frame rate and refresh rate: similar but different! In: *Epiphan.com* [online]. 6. 4. 2016 [cit. 2020-04-08]. Dostupné z: <https://www.epiphan.com/blog/frame-rate-refresh-rate/>
- [7] Photron. FASTCAM MINI UX. *Photron.com* [online]. © 2020 [cit. 2020-04-08]. Dostupné z: <https://photron.com/mini-ux/>
- [8] FRODLOVÁ, Barbora. *Modelování proudění s uvažováním vlivu smáčivosti povrchu*. Ostrava, 2012. Disertační práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
- [9] BÖHM, Pavel. Změření povrchového napětí vody během chvilky: Co je povrchové napětí. In: *Fyzweb.cz* [online]. 2. 5. 2010 [cit. 2020-04-08]. Dostupné z: <http://fyzweb.cz/clanky/index.php?id=144>
- [10] HOLUB, Jiří. *Smáčivost povrchu vůči kapalinám a druhá viskozita povrchu*. Brno, 2010. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Simona Fialová.
- [11] BARTOVSKÁ, Lidmila a Marie ŠÍŠKOVÁ. *Co je co v povrchové a koloidní chemii* [online]. Praha: VŠCHT Praha, 2005 [cit. 2020-04-09]. Dostupné z: http://147.33.74.135/knihy/uid_es-001/ebook.help.htm

- [12] EKOBAL. Povrchové napětí nepodceňujte. In: *Ekobal.cz* [online]. 27. 3. 2019 [cit. 2020-04-09]. Dostupné z: <https://www.ekobal.cz/o-nas/aktuality/povrchove-napeti-nepodcenujte>
- [13] BARTOVSKÁ, Lidmila a Marie ŠIŠKOVÁ. Úhel smáčení. In: BARTOVSKÁ, Lidmila a Marie ŠIŠKOVÁ. *Co je co v povrchové a koloidní chemii* [online]. Praha: VŠCHT Praha, 2005 [cit. 2020-04-09]. Dostupné z: http://147.33.74.135/knihy/uid_es-001/hesla/uhel_smaceni.html
- [14] BARTOVSKÁ, Lidmila a Marie ŠIŠKOVÁ. Hystereze úhlu smáčení. In: BARTOVSKÁ, Lidmila a Marie ŠIŠKOVÁ. *Co je co v povrchové a koloidní chemii* [online]. Praha: VŠCHT Praha, 2005 [cit. 2020-04-09]. Dostupné z: http://147.33.74.135/knihy/uid_es-001/hesla/hystereze_uhlu_smaceni.html
- [15] BOHÁČ, Robert. *Praktické aspekty měření kontaktních úhlů na povrchu filtračních přepážek* [online]. Ostrava, 2016. Diplomová práce. Vysoká škola Báňská - Technická Univerzita Ostrava. Hornicko-geologická fakulta. Vedoucí práce Jan Thomas [cit. 2020-04-09]. Dostupné z: https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/115659/BOH0008_HGF_N2102_2102T006_2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [16] KRÁSNÝ, Ivo. *Měření kontaktních úhlů smáčení a určování povrchové energie plastů* [online]. Zlín, 2010. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně [cit. 2020-04-09]. Dostupné z: https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/14169/kr%C3%A1sn%C3%BD_2010_dp.pdf?sequence=1
- [17] BARTOVSKÁ, Lidmila a Marie ŠIŠKOVÁ. Měření úhlu smáčení. In: BARTOVSKÁ, Lidmila a Marie ŠIŠKOVÁ. *Co je co v povrchové a koloidní chemii* [online]. Praha: VŠCHT Praha, 2005 [cit. 2020-04-09]. Dostupné z: http://147.33.74.135/knihy/uid_es-001/hesla/mereni_uhlu_smaceni.html
- [18] LEBEDOVÁ, Václava. *Studium nasákavosti nanovláken připravených z derivátů hyaluronanu*. Hradec Králové, 2013. Diplomová práce. Univerzita Karlova, Farmaceutická fakulta v Hradci Králové. Vedoucí práce Zdeňka Šklubalová.
- [19] Nanopharma. Elektrostatické zvlákňování. *Nanopharma.cz* [online]. © 2015 [cit. 2020-04-03]. Dostupné z: <https://www.nanopharma.cz/cs/produkty-a-technologie/technologie>
- [20] SCHILLER, Marek a kol. Využití ovlivnění povrchového napětí materiálů v technologiích povrchových úprav. In: *Engineering.sk* [online]. 26. 5. 2019 [cit. 2020-

- 04-03]. Dostupné z: <https://www.engineering.sk/clanky2/stroje-a-technologie/2841-vyuziti-ovlivneni-povrchoveho-napeti-materialu-v-technologiich-povrchovych-uprav>
- [21] VETCHÝ, Jan. *Hydrofobní impregnace betonu* [online]. Praha: MCT, spol. s r.o. [cit. 2020-04-06]. Dostupné z: <https://www.mct.cz/soubor/hydrofobni-impregnace/>
- [22] DOLEJŠÍ, Tomáš. Recenze makro objektivu Sigma 105mm f2.8 DG OS HSM. In: *Fotoradce.cz* [online]. 21. 3. 2012 [cit. 2020-04-10]. Dostupné z: <https://www.fotoradce.cz/recenze-makro-objektivu-sigma-105mm-f2-8-dg-os-hsm>
- [23] DRÁBKOVÁ, Sylva. *Mechanika tekutin*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2008. ISBN 978-80-248-1508-4.
- [24] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. Anomálie vody. In: *Jreichl.com* [online]. 2. 5. 2008 [cit. 2020-04-13]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/645-anomalie-vody#>
- [25] NABLA. Volný pád. *Nabla.cz* [online]. © 2013 [cit. 2020-04-13]. Dostupné z: <http://www.nabla.cz/obsah/fyzika/mechanika/volny-pad.php>
- [26] VŠB. *Význam adheze a koheze pro vodní organismy* [online]. Ostrava: VŠB TU Ostrava [cit. 2020-05-09]. Dostupné z: <http://hgf10.vsb.cz/546/Ekologicke%20aspekty/voda/fyzikalni/adheze.htm>

Poděkování

Děkuji mé vedoucí práce Ing. Janě Jablonské, Ph.D. za konzultace, cenné rady, informace a odborné vedení při práci na mé bakalářské práci. Děkuji mé rodině za podporu a poskytnutí ateliéru.

10 Seznam příloh

Příloha A – Vyhodnocení varianty 2.

Příloha B – Vyhodnocení varianty 3.

Příloha C – Vyhodnocení varianty 10.

Příloha D – Měřítko.

Příloha A – Vyhodnocení varianty 2

Varianta 2

V této variantě jsem kapal vodu do oleje. Reakce nebyly tak výrazné jako ve variantě 1. Sekundární reakce se sice projevila, ale pouze ve formě vlnění. Měřítka jsem použil stejné jako ve variantě 1.

Tab. 11.1 Vyhodnocení měřených a vypočtených hodnot varianty 2

Varianta 2			
Měřitelné veličiny			
Veličina	značení	hodnota	jednotka
Dráha kapky	s	0,1443	m
Hustota kapky	ρ	998	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Doba letu teoretická	t	0,17	s
Doba letu pozorována	t	0,16	s
Rychlost letu	v	1,68	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
Gravitační zrychlení	g	9,81	$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$
Kapka			
Průměr kapky	d	4,31	mm
Povrch kapky	P	58,54	mm^2
Objem kapky	V	42,12	mm^3
Hmotnost kapky	m	420,39	mg

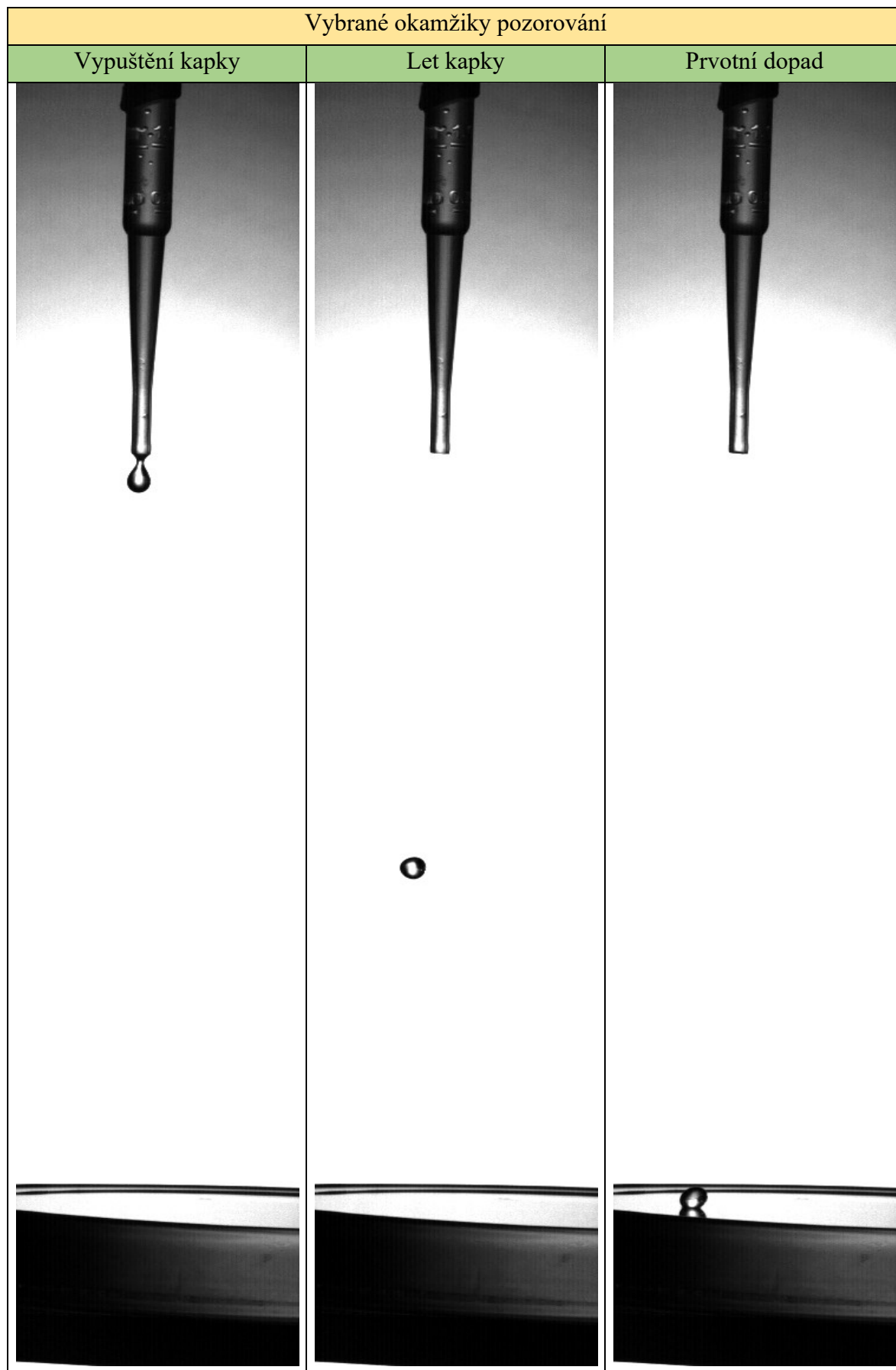
Časový průběh varianty 2:




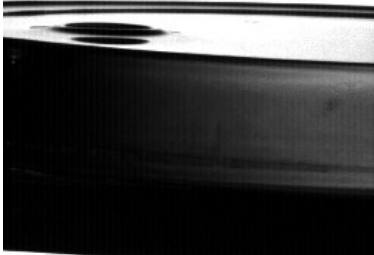
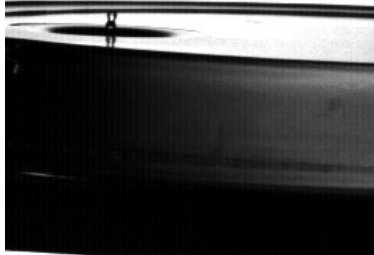
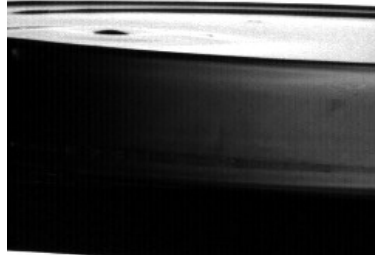
U tohoto videa byly úseky „*změna směru sekundární kapky*“ a „*dopad sekundární kapky*“ neprůkazné. To znamená, že se na videu neprojevily.

Tab.11.2 Časový průběh varianty 2

Úseky	Doba průběhu děje (s)	Reálný čas (s)
Vypuštění kapky	0	0
Let kapky		0–0,1636
Prvotní dopad	0,1636	0,1636
Okamžik nejvyššího prvního kráteru	0,0093	0,1729
Sekundární výtrysk	0,0208	0,1937
Změna směru sekundární kapky	Neprůkazné	
Dopad sekundární kapky		
Konec viditelných reakcí	1,1595	1,3532

Tab.11.3 Vybrané okamžiky varianty 2



Vybrané okamžiky pozorování		
Okamžik nejvyššího kráteru	Sekundární výtrysk	Konec viditelných reakcí
		
		

Příloha B – Vyhodnocení varianty 3

Varianta 3

Ve variantě 3 jsem kapal kapku oleje do vody. V této variantě se projevila sekundární reakce, kdy proběhl sekundární výtrysk. Oproti předchozím variantám jsem použil měřítko 2.

Tab. 12.1 Vyhodnocení měřených a vypočítaných hodnot varianty 3

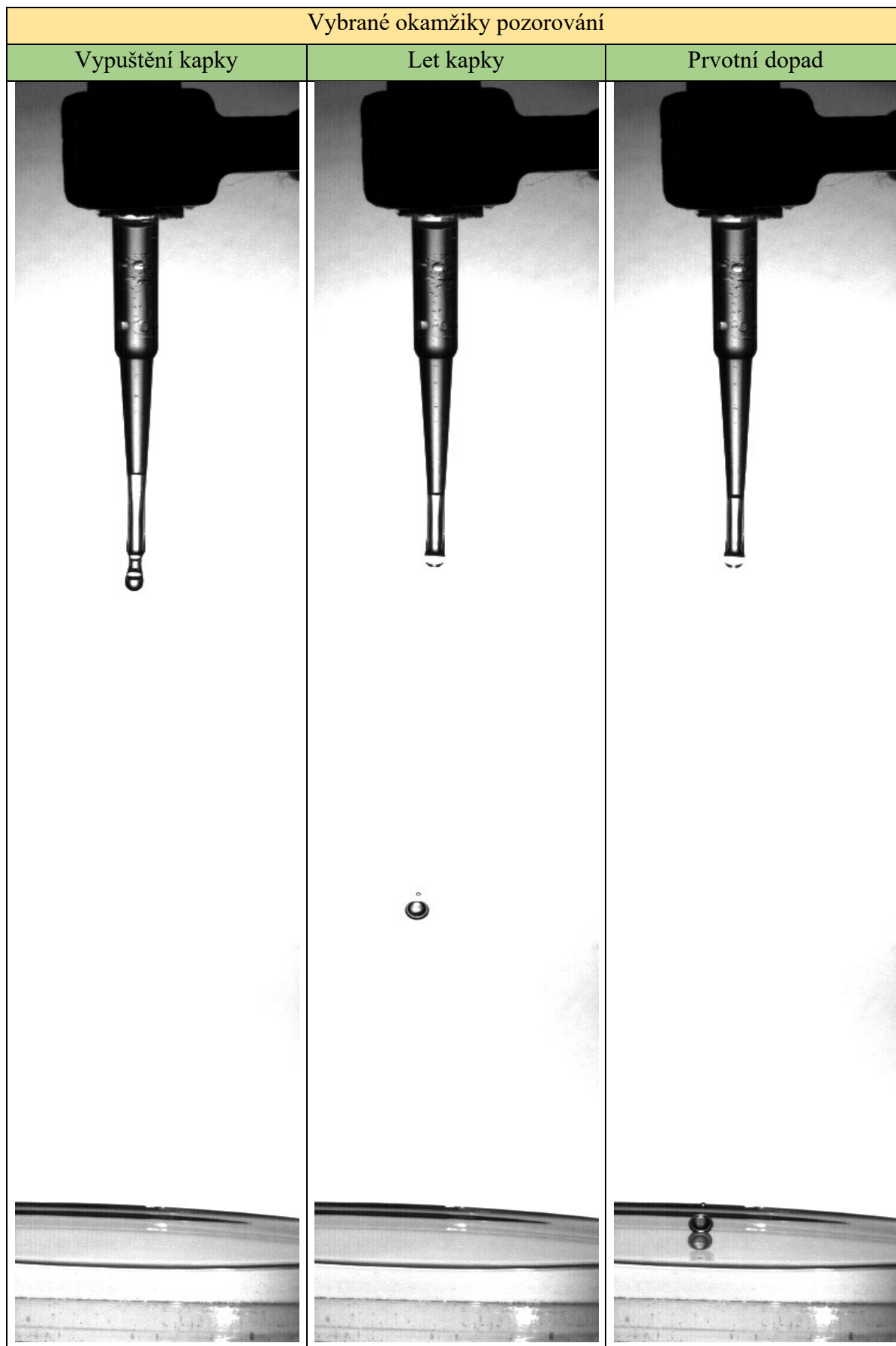
Varianta 3			
Měřitelné veličiny			
Veličina	značení	hodnota	jednotka
Dráha kapky	s	0,146	m
Hustota kapky	ρ	878	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Doba letu teoretická	t	0,172	s
Doba letu pozorována	t	0,178	s
Rychlost letu	v	1,69	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
Gravitační zrychlení	g	9,81	$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$
Kapka			
Průměr kapky	d	4,36	mm
Povrch kapky	P	59,72	mm^2
Objem kapky	V	43,39	mm^3
Hmotnost kapky	m	381,052	mg





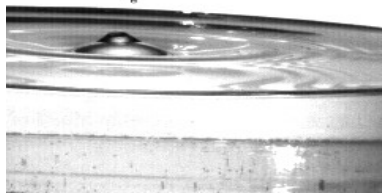
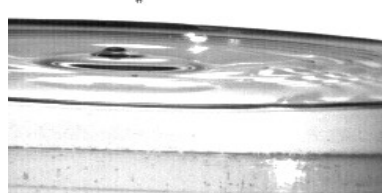
Časový průběh varianty 3:





Tab.12.2 Časový průběh varianty 3

Úseky	Doba průběhu děje (s)	Reálný čas (s)
Vypuštění kapky	0	0
Let kapky		0,1784
Prvotní dopad	0,1784	0,1784
Okamžik nejvyššího prvního kráteru	0,0058	0,1842
Sekundární výtrysk	0,0428	0,2270
Změna směru sekundární kapky	0,0212	0,2482
Dopad sekundární kapky	0,0496	0,2978
Konec viditelných reakcí	0,0112	0,3090

Tab.12.3 Vybrané okamžiky pozorování



Vybrané okamžiky pozorování		
Okamžik prvního kráteru	Sekundární výtrysk	Změna směru kapky
		
		

Vybrané okamžiky pozorování		
Dopad sekundární kapky	Konec viditelných reakcí	
 	 	

Příloha C – Vyhodnocení varianty 10

Varianta 10

Oproti předchozím variantám, kde jsem jako obě média použil kapalinu, jsem v tomto měření kapal kapku vody na povrch tvořený z jemného písku. Ve videu se projevila sekundární reakce ve formě obrazce, který se vytvořil po dopadu kapky. Ve videu se projevila chyba, kdy povrch nebyl dostatečně osvětlen. Tento problém jsem vyřešil upravením křivek jasu a kontrastu ve vybrané části videa. Měřítka jsem použil č. 3.

Tab.13.1 Vyhodnocení měřených a vypočítaných hodnot varianty 10


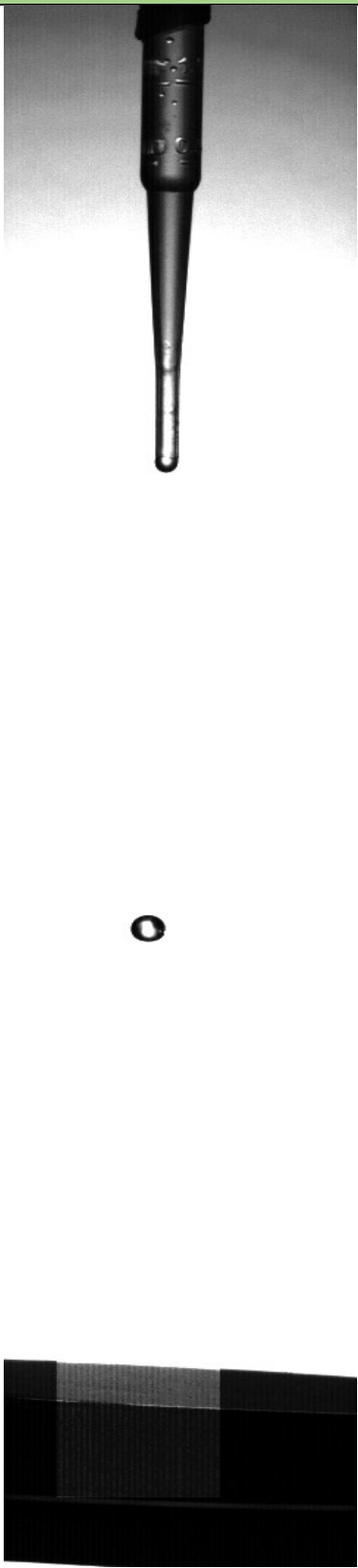

Varianta 10			
Měřitelné veličiny			
Veličina	značení	hodnota	jednotka
Dráha kapky	s	0,152	m
Hustota kapky	ρ	998	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Doba letu teoretická	t	0,176	s
Doba letu pozorována	t	0,1682	s
Rychlost letu	v	1,73	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
Gravitační zrychlení	g	9,81	$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$
Kapka			
Průměr kapky	d	4,27	mm
Povrch kapky	P	57,29	mm^2
Objem kapky	V	40,78	mm^3
Hmotnost kapky	m	406,96	mg

Časový průběh:

Tab.13.2 Časový průběh varianty 10

Úseky	Doba průběhu děje (s)	Reálný čas (s)
Vypuštění kapky	0	0
Let kapky	0,1682	0,1682
Dopad na sypký povrch	0,1682	0,1682
Rozplácnutí se	0,0060	0,1742
Započetí fáze vsakování se	0,0344	0,2086

Tab.13.3 Vybrané okamžiky pozorování

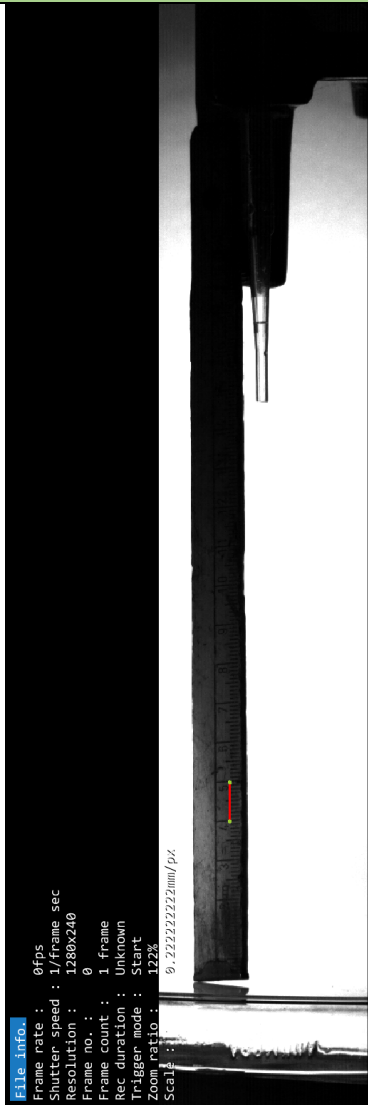
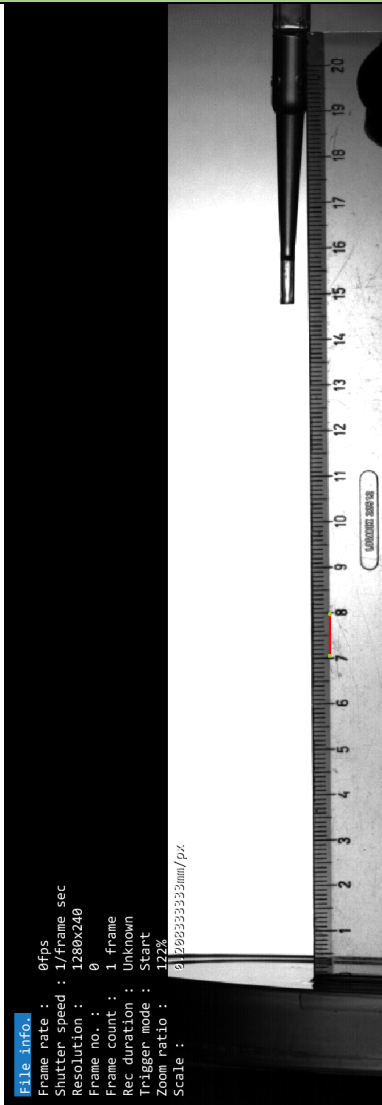
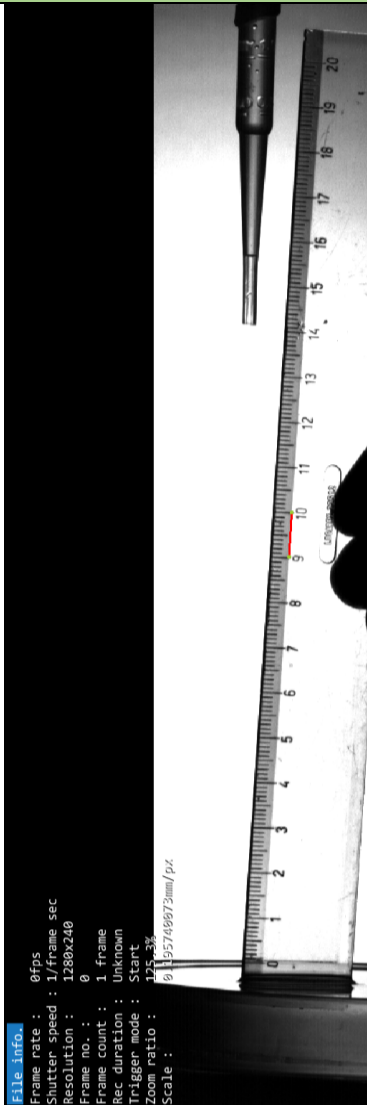
Vybrané okamžiky pozorování		
Vypuštění kapky	Let kapky	Dopad na sypký povrch
		

Vybrané okamžiky pozorování		
Rozplácnutí se	Započetí fáze vsakování se	Povrch po dopadu
		
		

Příloha D

Měřítka

Tab.14.1 Měřítka

Měřítka		
Měřítko 1	Měřítko 2	Měřítko 3
 <p>File info: Frame rate : 0fps Shutter speed : 1/frame sec Resolution : 1280x240 Frame no. : 0 Frame count : 1 frame Rec duration : Unknown Trigger mode : Start Zoom ratio : 122% Scale : 0.2222222222222222mm/px</p>	 <p>File info: Frame rate : 0fps Shutter speed : 1/frame sec Resolution : 1280x240 Frame no. : 0 Frame count : 1 frame Rec duration : Unknown Trigger mode : Start Zoom ratio : 122% Scale : 0.2063333333333333mm/px</p>	 <p>File info: Frame rate : 0fps Shutter speed : 1/frame sec Resolution : 1280x240 Frame no. : 0 Frame count : 1 frame Rec duration : Unknown Trigger mode : Start Zoom ratio : 125.3% Scale : 0.1957456973mm/px</p>

Tab. 14.2 Přiřazení měřítek k variantám

Měřítka použitá ve variantách		
Měřítko 1	Měřítko 2	Měřítko 3
Varinata1	Varianta3	Varianta 2
	Varianta 4	Varianta 9
	Varianta 5	Varianta 10
	Varianta 6	Varianta 11
	Varianta 7	Varianta 12
	Varianta 8	

Tab. 14.3 Převod pixelů na milimetry

Reálna hodnota jednoho pixelu	
Měřítko 1	0,2222 mm
Měřítko 2	0,2083 mm
Měřítko 3	0,1957 mm